Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics,34, 2022. (35-66)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Non-Newtonian Conjugate Heat Transfer under the Impact of Uniform and Non-Uniform Magnetic Field Along with Heat Absorption/Production inside a Two-Dimensional Chamber Containing a Block at Different Temperatures; an Entropy Analysis with LBM*

Research Article

Mohammad Nemati[1], Mohammad Sefid[2]*

DOI: 10.22067/jacsm.2022.77136.1125

1. Introduction

The assessment of convection heat transfer inside closed chambers has various applications, such as cooling electronic equipment, designing solar collectors, and building air conditioning. Now, if the synchronic examination of thermal conductivity with the convection process is momentous (widely used in various industries, including the construction of heat exchangers), it reveals the necessity of this type of study. Since in reality and industrial applications, the used fluids show non-Newtonian behavior, it is very momentous to analyze the influence of different parameters on the flow caused by the presence of such fluids. Among the methods of controlling flow power, the amount of heat transfer and entropy is the use of active (energy consumption) and passive (without energy consumption) methods. Examples of passive and active methods are chamber inclination angle and applying the magnetic field, respectively. The presence of magnetic field and heat absorption/production, which are the tools for controlling fluid flow, are widely used in many industries, including the nuclear industry. The presence of an obstacle in the path of fluid flow, sometimes by force or sometimes voluntarily, leads to changes in the characteristics of the flow by which the entropy value can be controlled.

2. Statement of the problem

Figure 1 shows the conjugate heat transfer process caused by the free convection of electrically conductive fluid with the power-law model inside the two-dimensional chamber with L×L dimensions considered in the present work. A conductive wall with a thickness of 0.1H is assumed in the vicinity of the hot wall of the chamber, which transfers heat from the wall to the fluid. A rectangular obstacle is placed at temperature between the cold and hot walls in the flow path, while uniform heat absorption/production affects the fluid flow. The magnetic field affects the chamber horizontally from left to right in three different ways. The following are assumed in this numerical simulation: 1) two-dimensional flow; 2) incompressible and stable flow regime; 3) absence of thermal radiation and viscous loss; 4) the use of Boussinesq approximation for density; 5) non-surfaces permeable and non-slip fluid on surfaces; 6) applying the gravity field vertically.

Lattice Boltzmann Method (LBM) was developed for modeling the non-uniform magnetic field in the presence of heat absorption/production. Three separate distribution functions for flow, temperature, and magnetic fields were used for simulation.

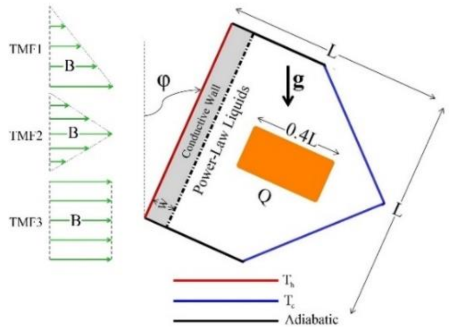


Figure 1. A view of the problem geometry under research

3. Results

Because non-Newtonian fluids used in real applications have a high Prandtl number, Pr=50 was set to perform calculations. Considering that LBM is based on square grid, the solution domain was chosen 100×100 and the bounce back model was used to model the boundary conditions. The studied parameters are listed in Table 1. Based on the results obtained: 1) in all modes, the enhancement of the Hartmann number causes a decrease in the flow velocity and consequently decreases the flow power and the mean Nusselt number. On average, this effect for the shear thinning fluid is about 32% more than the shear thickening fluid; 2) the type of magnetic field applied is a very momentous parameter in controlling the amount of heat transfer, and this variable can be used to

*Manuscript received: 14 June 2022; Revised, 12 July 2022, Accepted, 28 August 2022.

[1]. PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
[2]. Corresponding author. Professor, Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
Email: mhsefid@yazd.ac.ir

achieve flows with desired strength. Applying the magnetic field in a uniform manner leads to a further decrease in heat transfer and flow strength compared to other cases.

Table 1. The variables along with the corresponding values

Variable	Values
Hartmann number	Ha=0,20,40,60
Type of magnetic field	TMF1,TMF2,TMF3
Rayleigh number	$Ra=10^3,10^5$
Power-law index	n=0.75,1,1.25
Angle of chamber inclination	$\lambda=-90^{\circ},0,+90^{\circ}$
Coefficient of heat absorption/production	-10,0,+10
Thermal conductivity ratio	0.5,1,10

The effect of changing the type of magnetic field applied decreases with increasing power-law index; 3) an increase in the power-law index leads to an increase in the viscosity of the fluid and causes the ease of movement of the fluid to decrease. Due to the low convection effects for the shear thickening fluid, the influence of augmentation of the Hartmann number for the shear thickening fluid is much less compared to the Newtonian and shear thinning fluid; 4) by changing the way the chamber is placed, the amount of heat transfer and the flow power can be controlled. By using this passive method, it is possible to control the effect of the magnetic field in such a way that the lowest value of the average Nusselt number, the entropy production, and the effect of the magnetic field are obtained for an inclination angle of +90 degrees. The average Nusselt number for the zero angle is about 1.25 and 2.6 times higher than the angles of -90 and +90 degrees, respectively; 5) the lower the thermal conductivity ratio, the lower the average Nusselt number and the produced entropy. With the augmentation of this variable, the impact of the magnetic field is more obvious and the change of this parameter has a negligible effect on the characteristics of the flow and heat transfer of the shear thickening fluid and on the $Ra=10^3$; 6) in the heat production mode, the lowest value of the mean Nusselt number is seen, but the influence of the magnetic field is the greatest in this state. The flow power increases with the increase of heat absorption/production coefficient. The heat absorption/production effect is the least for the shear thickening fluid; 7) in general, the largest contribution of the entropy produced for the shear thickening fluid in all cases belongs to the entropy produced due to heat transfer. By increasing the thermal conductivity ratio, increasing the Rayleigh number, decreasing the power-law index, and decreasing the Hartmann number, the Bejan number decreases (according Figure 2 (A-C)); 8) it was observed that in the case of heat production, the total entropy produced increases by about 20% with the increase of the Hartmann number, and in return, the increase of the Hartmann number leads to a decrease in entropy produced for $HAPC \leq 0$.

4. Conclusions

The motivation of the existing numerical simulation was evaluating and analyzing the conjugate heat transfer and entropy generation by the power-law fluid inside the two-dimensional chamber with a variable placement angle containing an exothermic barrier under effect of non-uniform magnetic field and uniform heat absorption/production based on the 1st and 2nd laws of thermodynamics. Simulation was done by writing computer codes in Fortran language using LBM. The results showed that LBM is a suitable alternative for solving problems in CFD due to its special features such as: 1) replacing quasi-linear equations instead of complex and nonlinear equations; 2) having a simple algorithm; and 3) explicitness of the equations. Using a separate distribution function to model the magnetic field results in higher accuracy compared to the case where two distribution functions are assumed for the flow field and the temperature field and the magnetic field is applied as a source term.

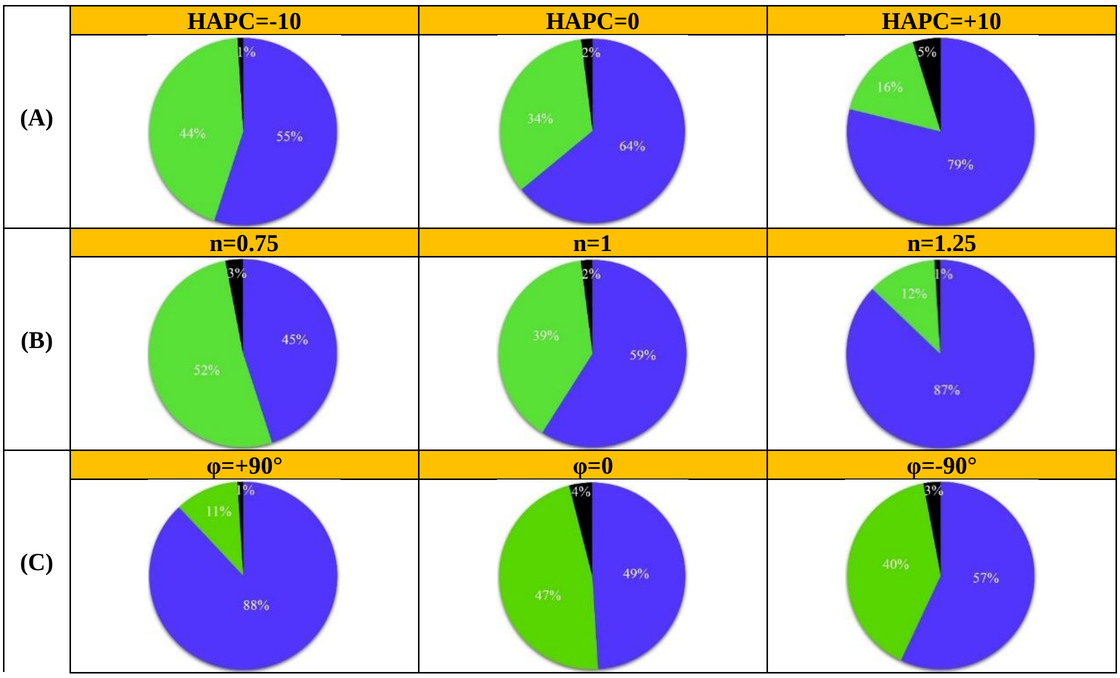


Figure 2. Distribution percentage of the share of each of the entropy production factors in the total entropy production

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۴، ۱۴۰۱. (۶۶-۳۵)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

استفاده از روش لتیس بولتزمن در تحلیل آنتروپی تولید شده طی انتقال حرارت دوگانه سیال با مدل توانی در حضور جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی*

مقاله پژوهشی

محمد نعمتی[۱] محمد سفید[۲]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.77136.1125

چکیده در کار حاضر مقدار آنتروپی تولید شده ناشی از انتقال حرارت دوگانه سیال با مدل توانی درون محفظه دو بعدی متمایل تحت اثر میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت با وجود جذب/تولید گرما بررسی شده است. بر اساس یافته‌های پژوهش، قدرت جریان، مقدار انتقال حرارت و آنتروپی تولید شده با افزایش عدد هارتمن، کاهش عدد رایلی و افزایش شاخص توانی سیال، کاهش می‌یابد. با کاهش شاخص توانی سیال، اثر میدان مغناطیسی بارزتر می‌شود به نحوی که افزایش عدد هارتمن تا بیشترین مقدار، در حدود ۵۲ درصد برای سیال نازک‌شونده و تا حدود ۱۸ درصد برای سیال ضخیم‌شونده از مقدار عدد ناسلت متوسط می‌کاهد. هر اندازه عدد هارتمن بیشتر باشد، تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی مشهودتر است که این اثر برای سیال ضخیم‌شونده کمترین است. با اعمال میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت می‌توان به جریانی با قدرت کمتر و عدد ناسلت کوچک‌تری دست یافت. چنانچه نسبت هدایت حرارتی افزایش یابد، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط حاصل می‌شود که در این حالت اثر افزایش عدد هارتمن و عدد رایلی محسوس‌تر می‌شود. کمترین مقدار انتقال حرارت، قدرت جریان و اثر میدان مغناطیسی زمانی حاصل می‌شود که محفظه در زاویه ۹۰+ درجه قرار گیرد که در این حالت عدد ناسلت متوسط تا حدود ۸۲ درصد کمتر از زاویه صفر است. عدد بجان با افزایش ضریب جذب/تولید گرما، افزایش عدد هارتمن، کاهش عدد رایلی و کاهش نسبت هدایت حرارتی، افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار عدد بجان در زاویه ۹۰+ درجه حاصل می‌شود.

واژه های کلیدی انتقال حرارت دوگانه، سیال با مدل توانی، میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت، تولید آنتروپی، جذب/تولید گرمای یکنواخت، زاویه تمایل محفظه.

Non-Newtonian Conjugate Heat Transfer under the Impact of Uniform and Non-Uniform Magnetic Field Along with Heat Absorption/Production Inside a Two-Dimensional Chamber Containing a Block; an Entropy Analysis by LBM

Mohammad Nemati Mohammad Sefid

Abstract *In the existing work, the amount of entropy produced due to power-law fluid conjugate heat transfer within an inclined 2D chamber under the influence of magnetic fields in different forms with absorption/production of heat has been evaluated. According to the research findings, flow power, heat transfer value and entropy production decline with enhancing Hartmann number, decreasing Rayleigh number and enhancing fluid power-law index. The increase of the Hartmann number to the maximum value reduces the value of the mean Nusselt number by about 52% for shear thinning fluid and by about 18% for the shear thickening fluid. The higher the Hartmann number, the more obvious is the change in the type of applied magnetic field, and this effect is the least for the shear thickening fluid. By applying the magnetic field in a uniform mode, a current with a lower power and a smaller Nusselt number can be achieved. If the thermal conductivity ratio increases, the highest mean Nusselt number is obtained, and in this case, the effect of increasing the Hartmann number and Rayleigh number becomes more noticeable. The lowest amount of heat transfer, current strength and magnetic field effect is obtained when the chamber is placed at an angle of +90 degrees, in which case the mean Nusselt number is about 82% less than the zero angle. Bejan number enhances with the increase of heat absorption/production coefficient, increase of Hartmann number, decrease of Rayleigh number and decrease of thermal conductivity ratio, and the highest value of Bejan's number is obtained at +90 degree angle.*

Keywords Conjugate heat transfer; Power-law liquids; Uniform and non-uniform magnetic field; Entropy generation; Uniform heat absorption/production; Inclination angle of chamber.

*تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۳/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۶/۶ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

Email: mhsefid@yazd.ac.ir

مقدمه

یکی از روش‌های کنترل انتقال حرارت ناشی از فرآیندهای همرفت از جمله جابجایی طبیعی، استفاده از تاثیر میدان‌های مغناطیسی بر جریان سیال است. تجزیه و تحلیل جریان سیال در معرض میدان‌های مغناطیسی به عنوان هیدرودینامیک مغناطیسی (Magnetohydrodynamics) شناخته می‌شود. از این نوع جریان می‌توان به عنوان محیط جدیدی برای اندازه‌گیری آزمایش‌های اشعه ایکس و گرم کردن بافت‌های سلولی با خواص سیال مغناطیسی در یک میدان متناوب استفاده نمود [1-4]. انتقال حرارت جابجایی طبیعی و هیدرودینامیک مغناطیسی که بر هم کنش‌های سیال و نیروی مغناطیسی را مطالعه می‌کند، کاربردهای مختلفی در صنعت دارد و بسیار مورد توجه محققین قرار دارد. از جمله این کاربردها می‌توان به خنک‌سازی قطعات الکترونیکی، رآکتورهای هسته‌ای، کلکتورهای خورشیدی، صنایع بهداشتی و غذایی و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد. تاکنون روش‌های متعددی برای مدل کردن این نوع پدیده به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به روش حجم محدود، روش المان محدود، روش تفاضل محدود و روش لتیس بولتزمن (Lattice Boltzmann method) اشاره داشت [5-8].

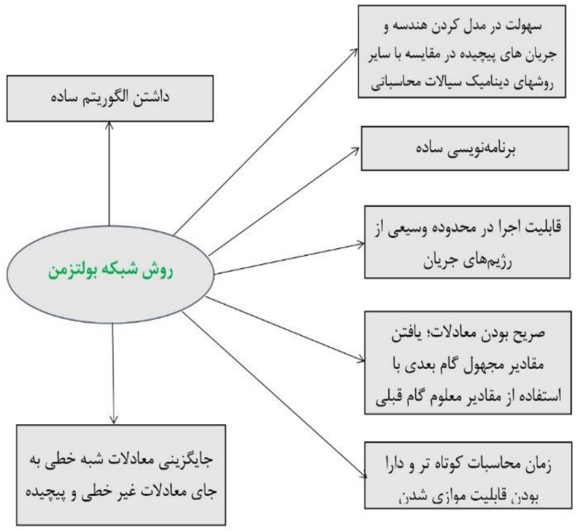
از جمله مهمترین دلایلی که محققان را واداشته جریان سیالات با خاصیت غیرنیوتنی را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهند، استفاده فراوان این دسته از سیالات در کاربردهای واقعی و صنایع گوناگون همچون صنایع شیمیایی است. ویژگی سیالات نیوتنی، ارتباط خطی بین تنش و نرخ برش است که ضریب ثابتی به نام لزجت (ویسکوزیته) عامل پیونده‌دهنده است در حالی که این ارتباط در مایعات و سیالات غیرنیوتنی دیده نمی‌شود. از آنجایی که در مایعات و سیالات نیوتنی، لزجت تنها تابعیت از دما و فشار دارد، بنابراین ویسکوزیته به نیروی خارجی وارد بر آن وابسته نیست. بر خلاف سیالات نیوتنی، در سیالات غیرنیوتونی ضریبی ثابت مانند لزجت برای توصیف وضعیت تنش برشی معنا نخواهد داشت. یکی از مهمترین و روزمره‌ترین جریان سیالات غیرنیوتنی، جریان خون در بدن است [9-12].

بررسی تأثیر شکل محفظه با توجه به تغییرات شرایط مرزی سرعت و دمایی مختلف بر میزان انتقال حرارت و قدرت جریان‌های شکل گرفته ناشی از آن یکی از مسائل مورد علاقه و توجه پژوهشگران از گذشته تا کنون به شمار می‌رود. با توجه به کاربرد جریان انتقال حرارت درون محفظه‌های بسته مانند استفاده در ماشین‌های الکتریکی، دستگاه‌های میکروالکترونیک و کلکتورهای خورشیدی، ضرورت استفاده بهینه از فضا در طراحی این دستگاه‌ها و استفاده از محفظه‌هایی با مقاطع مختلف می‌تواند به طور حتم مفید و ضروری باشد [13-16].

جذب/تولید گرما نقش بسیار مهمی در پدیده‌های مختلفی چون انرژی هسته‌ای و مدل‌سازی احتراق دارد. از جمله روش‌هایی که محققین در تقویت عملکرد حرارتی سیستم‌های انرژی به کار گرفته‌اند، انتقال حرارت در محفظه تحت اثر میدان مغناطیسی با جذب/تولید گرما است [17-20].

انتقال حرارت مزدوج (جامد-سیال) یک فرآیند رایج در انتقال حرارت تجهیزات صنعتی و مهندسی است. از جمله کاربردهای آن می‌توان انتقال حرارت در محفظه‌های احتراق، مبدل‌های حرارتی، میکروکانال‌ها و خنک‌کننده تجهیزات الکترونیکی اشاره داشت [21-23]. شبیه‌سازی مسائل انتقال حرارت مزدوج توسط محققان با استفاده از روش‌های عددی مرسوم در حل معادلات ناویر استوکس و معادلات انرژی مانند روش حجم محدود، روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود اجرا شده است اما به دلیل خواص متفاوت ماده در تبادل حرارت بین مرزهای جامد و سیال، مشکلاتی را در شبیه سازی عددی ایجاد کرده است [24-26].

یکی از پر کاربردترین و مهمترین روش‌ها در مقیاس مزوسکوپیک، روش لتیس بولتزمن (LBM) است که در آن تعداد ذرات توزیع شده در میدان ارتباطی با تعداد مولکول‌ها ندارد و تنها وابسته به تعداد شبکه‌ها و گره‌ها است. ارائه یک مدل جنبشی ساده، ایده و طرح اصلی این روش عددی است که از طریق متوسط‌گیری خواص میکروسکوپیک، خواص ماکروسکوپیک حاصل می‌شود که از این طریق معادلات اصلی بر جریان سیال (بقای جرم، انرژی و مونتوم) ارضا می‌شود. خصوصیاتی و ویژگی‌های این روش عددی در شکل (۱) ارائه شده است. در کنار مزایای فراوانی که این روش برای مدل کردن جریان سیالات دارد، محدودیت‌هایی هم در تحلیل جریان سیال با استفاده از این روش وجود دارد که از آن جمله می‌توان به ناپایداری در لزجت پایین و افزایش زمان و حجم محاسبات در شبکه‌بندی‌های ریز به دلیل شبکه‌بندی مربعی در این روش اشاره داشت [27-30].



شکل ۱ خصوصیات و ویژگی‌های روش لتیس بولتزمن

از آنجایی که تعیین میزان انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود، بررسی کارایی تجهیزات و مدل-های فیزیکی هم بسیار با اهمیت است. یکی از پارامترهای مهم در تعیین بازده عملکرد دستگاه‌ها، آنتروپی است. این مفهوم که از قانون دوم ترمودینامیک نشأت می‌گیرد، بیان می‌کند هر اندازه مقدار آنتروپی تولید شده بیشتر باشد، به دلیل ایجاد بازگشت-ناپذیری، راندمان ترمودینامیکی سیستم کاهش می‌یابد. کاهش و یا از بین رفتن قابلیت کاردهی دستگاه‌ها و تجهیزات نتیجه تولید آنتروپی است. بنابراین با توجه به جمیع این موارد، محققان علاوه بر تحلیل قانون اول، قانون دوم ترمودینامیک را نیز مد نظر قرار می‌دهند و تمرکز بر این موضوع در سالیان اخیر از اهمیت بالایی برخوردار شده است [31-34].

از آنجایی که در پژوهش حاضر از روش عددی شبکه بولتزمن استفاده شده است و با توجه به تعدد کلمات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق حاضر، مروری بر مطالعات گذشته با تأکید بر اولویت بر سالیان اخیر در زیر ارائه شده است. مهمترین دستاوردها ارائه شده و در پایان نیز مواردی که در اثر ذکر شده با توجه به کار حاضر بررسی نشده و فقدان آن احساس می‌شود بیان شده تا نوآوری و ضرورت تحقیق حاضر به وضوح مشخص شود.

۱- ارزیابی تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت و نسبت ابعاد محفظه بر روی انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی با مدل توانی درون محفظه C شکل توسط آقاخانی و همکاران [35] با LBM در سال ۲۰۱۸: ۱- کاهش عدد ناسلت متوسط و قدرت جریان شکل گرفته درون محفظه با افزایش نسبت ابعاد محفظه به دلیل کاهش فضای چرخش سیال، ۲- کمترین اثر میدان مغناطیسی در کاهش قدرت جریان و میزان انتقال حرارت برای سیال ضخیم‌شونده، ۳- عدم بررسی اثرات نسبت هدایت جرارتی جامد-سیال، جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر جریان سیال و عدم بررسی میزان آنتروپی تولید شده.

۲- ارزیابی عددی انتقال حرارت دوگانه طی جابجایی طبیعی سیال نیوتنی درون محفظه دو بعدی متخلخل با LBM توسط رضایی و مغربی [36] در سال ۲۰۱۹: ۱- افزایش نیروهای شناوری، قدرت جریان و مقدار انتقال حرارت به واسطه افزایش عدد رایلی، ۲- کاهش میزان انتقال حرارت با افزایش ضخامت دیواره‌ها، ۳- ، افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش نسبت نفوذ حرارتی جامد به سیال، ٤- عدم در نظر گرفتن اثرات میدان مغناطیسی و جذب/تولید گرما در تولید آنتروپی برای سیال غیر نیوتنی.

۳- کاربرد LBM در شبیه‌سازی انتقال حرارت دوگانه سیال نیوتنی درون محفظه دو بعدی مربعی شکل با دیواره‌ای رسانا توسط فرهی و همکاران [37] در سال ۲۰۱۹: ۱- افزایش سرعت انتقال حرارت با افزایش نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال، ۲- افزایش تأثیر رشد نسبت هدایت حرارتی با افزایش قدرت نیروهای شناوری، ۳- عدم تحلیل آنتروپی برای سیال غیر نیوتنی بدون در نظر گرفتن جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی.

٤- تحلیل اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر میزان آنتروپی تولید شده در طی انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال با مدل توانی درون محفظه L شکل با استفاده از LBM توسط ژانگ و همکاران [38] در سال ۲۰۲۰: ۱- کاهش نرخ انتقال حرارت با افزایش نسبت ابعاد محفظه به دلیل کم شدن اثرات جابجایی، ۲- اثر بیشتر میدان مغناطیسی در کاهش عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و کاهش شاخص توانی سیال، ۳- کاهش پیوسته مقدار انتقال حرارت و آنتروپی تولید شده با افزایش عدد هارتمن برای سیال نازک‌شونده و نیوتنی، ٤- عدم تفاوت در اثر اعمال میدان مغناطیسی برای سیال ضخیم‌شونده، ۵- عدم بررسی اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بدون در نظر داشتن اثرات جذب/تولید گرما و نسبت هدایت جرارتی جامد-سیال.

۵- استفاده از LBM در تحلیل اثر نوع توزیع دمای دیواره محفظه مربعی شکل بر انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان

مغناطیسی یکنواخت توسط عباسی و همکاران [39] در سال ۲۰۲۰: ۱- افزایش بیشینه مقدار تابع جریان با افزایش عدد رایلی و ضریب جذب/تولید گرما، ۲- کاهش مشهود اثر جذب/تولید گرما با افزایش عدد رایلی به خصوص در عدد رایلی 10^6، ۳- کاهش قدرت جریان با افزایش قدرت میدان مغناطیسی و کاهش قدرت نیروهای شناوری، ٤- تغییر چشمگیر الگوی جریان و مقدار انتقال حرارت با تغییر نوع توزیع دمای دیواره، ٥- عدم بررسی میزان آنتروپی تولید شده برای سیال غیر نیوتنی تحت اثر میدان مغناطیسی با در نظر داشتن اثرات نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال.

٦- شبیه‌سازی انتقال حرارت دوگانه در یک حفره مربعی متشکل از پارتیشن‌های رسانا توسط LBM توسط محبی و رسام [40] در سال ۲۰۲۰: ۱- دست‌یابی به دقت بالای شبیه‌سازی با LBM در مقایسه با سایر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، ۲- عدم بررسی آنتروپی تولیدی برای سیال غیرنیوتنی در حضور جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی.

۷- بررسی اثر میدان میدان مغناطیسی یکنواخت بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال غیرنیوتنی با مدل توانی درون محفظه بیضوی شکل متمایل در حضور جذب/تولید گرمای یکنواخت به وسیله LBM توسط نعمتی و همکاران [41]: ۱- کاهش عدد ناسلت متوسط با افزایش ضریب تولید گرما و کاهش ضریب جذب گرما ، ۲- مشاهده کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط در بیشترین مقدار عدد هارتمن و ضریب تولید گرما، ۳- استفاده از زاویه قرارگیری محفظه به عنوان پارامتری کنترل کننده بر میزان انتقال حرارت و قدرت جریان بدون صرف انرژی و هزینه زیاد، ۳- عدم بررسی اثرات نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال و میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر مشخصات جریان و انتقال حرارت و عدم ببررسی مقدار تولید آنتروپی.

۸- تحلیل اثر میدان مغناطیسی یکنواخت و پریودیک (توزیع سینوسی) بر جریان انتقال حرارت جابجایی ترکیبی تحت جذب/تولید گرما درون محفظه ربع‌دایره‌ای شکل متخلخل حاوی مانعی دایره‌ای شکل با LBM توسط نعمتی و همکاران [42] در سال ۲۰۲۱: ۱- دست‌یابی به جریانی با قدرت بیشتر با اعمال میدان مغناطیسی پریودیک به جای اعمال یکنواخت به دلیل اعمال کمتر متوسط نیروی حجمی لورنز به سیال، ۲- نزدیک شدن اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت به حالت یکنواخت با افزایش تعداد موج‌های نوسان، ۳- تغییر بارز در الگوهای دمایی و خطوط جریان با وجود جذب/تولید گرما، ٤- کنترل جریان با تغییر زاویه اعمال سرعت دیواره‌ها، ٥- عدم بررسی اثرات میدان مغناطیسی در شکل‌های مختلف برای سیال غیرنیوتنی و نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال در تعیین مقدار آنتروپی تولید شده.

۹- ارزیابی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر میزان آنتروپی تولید شده به واسطه انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال غیر نیوتنی با مدل توانی درون محفظه مستطیلی شکل با LBM توسط رحمان و همکاران [43] در سال ۲۰۲۱: ۱- وابستگی مشهود جریان و انتقال حرارت به عدد رایلی، عدد هارتمن و شاخص توانی سیال، ۲- تأثیر بیشتر میدان مغناطیسی در کاهش قدرت جریان و مقدار انتقال حرارت به ازای اعداد هارتمن بزرگتر از ۲۰، ۳- کاهش اثرات جابجایی با افزایش شاخص توانی سیال و کاهش عدد رایلی، ٤- تغییر ناچیز عدد ناسلت متوسط با تغییر شاخص توانی سیال در اعداد رایلی پایین و در حضور میدان مغناطیسی پر قدرت، ٥- کمتر بودن اثر تغییر عدد بجان با توجه به تغییر قدرت میدان مغناطیسی برای سیال ضخیم-شونده، ٦- عدم بررسی اثرات نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال و جذب/تولید گرما بدون در نظر گرفتن میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در شکل‌های مختلف و عدم بررسی آنتروپی.

۱۰- تحلیل اثر تغییر هندسه محفظه ذوزنقه شکل با افزایش نسبت ابعاد بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی یکنواخت و پریودیک (توزیع سینوسی) تحت زوایای مختلف و تولید/جذب گرما به وسیله توسط نعمتی و همکاران [44] در سال ۲۰۲۱: ۱- کمتر بودن عدد ناسلت تا حدود ۱۵ درصد با اعمال میدان مغناطیسی به صورت افقی، ۲- کاهش بیشتر عدد ناسلت متوسط برای حالت تولید گرما در حضور میدان مغناطیسی، ۳- بیشتر بودن قدرت جریان با اعمال میدان مغناطیسی به صورت غیر یکنواخت، ٤- آشکارتر شدن اثر نوع اعمال میدان مغناطیسی با افزایش نسبت ابعاد محفظه، ٥- عدم بررسی اثرات جذب/تولید گرما برای سیال غیر نیوتنی و اثرات نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال در تولید آنتروپی.

۱۱- تعیین میزان اثر بخشی میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال با مدل توانی درون محفظه مربعی شکل با توزیع سینوسی دیواره‌های عمودی با دو مانع مربعی شکل گرمازا با LBM توسط رستمی و همکاران [45] در سال ۲۰۲۱: ۱- کاهش لزجت سیال با افزایش شاخص توانی سیال و به

تبع آن کاهش سرعت سیال درون محفظه، ۲- افزایش گرادیان دما در مجاورت دیواره‌های عمودی و افزایش نرخ انتقال حرارت به ویژه در مقادیر کم شاخص توانی سیال، ۳- تأثیر بارز نوع توزیع دما بر مقدار عدد ناسلت متوسط با توجه به تغییر الگوهای دما، ٤- عدم بررسی اثرات جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی غیریکنواخت در شکل‌های مختلف بر مشخصات جریان و عدم در نظر گرفتن نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال در تحلیل آنتروپی.

۱۲- بررسی تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت دوگانه درون یک محفظه دو بعدی حاوی دیواره‌های رسانا با ضریب پخش متغیر نسبت به سیال توسط فرهی و همکاران [46] در سال ۲۰۲۱: ۱- وابستگی شدید انتقال حرارت، عدد بجان و آنتروپی تولیدی به میدان مغناطیسی و جهت اعمال آن، ۲- افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی و کاهش عدد هارتمن، ۳- کاهش مقدار آنتروپی تولید شده و افزایش عدد بجان با اعمال میدان مغناطیسی، ٤- اثر بارز اندازه دیواره‌های رسانا بر مقدار آنتروپی تولیدی و مقدار انتقال حرارت، ٥- عدم بررسی اثرات جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی غیر یکنواخت برای سیال غیرنیوتنی در تعیین میزان آنتروپی تولید شده.

۱۳- تحلیل اثر جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی یکنواخت بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون محفظه دو بعدی با هندسه مختلف با LBM توسط نعمتی و همکاران [47] در سال ۲۰۲۲: ۱- بیشتر بودن تأثیر افزایش قدرت میدان مغناطیسی در کاهش عدد ناسلت متوسط به ازای تولید گرما، ۲- تغییر محسوس اثر افزایش عدد هارتمن با تغییر در هندسه محفظه، ۳- عدم بررسی مقدار آنتروپی تولید شده بدون در نظر گرفتن انواع مختلف سیال و در نظر نگرفتن میدان مغناطیسی غیریکنواخت در شکل‌های مختلف بدون لحاظ نمودن اثرات هدایت حرارتی جامد-سیال.

۱٤- استفاده از LBM برای ارزیابی اثر زاویه اعمال میدان مغناطیسی بر میزان آنتروپی تولید شده در طی انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال با مدل توانی درون محفظه مستطیلی شکل توسط رحمان و همکاران [48] در سال ۲۰۲۲: ۱- تطابق قابل قبول نتایج حاصل شده از روش لتیس بولتزمن با سایر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، ۲- کاهش بیشتر عدد ناسلت متوسط با افزایش زاویه اعمال میدان مغناطیسی، ۳- کاهش کمتر عدد ناسلت متوسط ناشی از اعمال میدان مغناطیسی با افزایش شاخص توانی سیال، ٤- عدم بررسی اثرات جذب/تولید گرما، نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال و میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر میزان آنتروپی تولید شده.

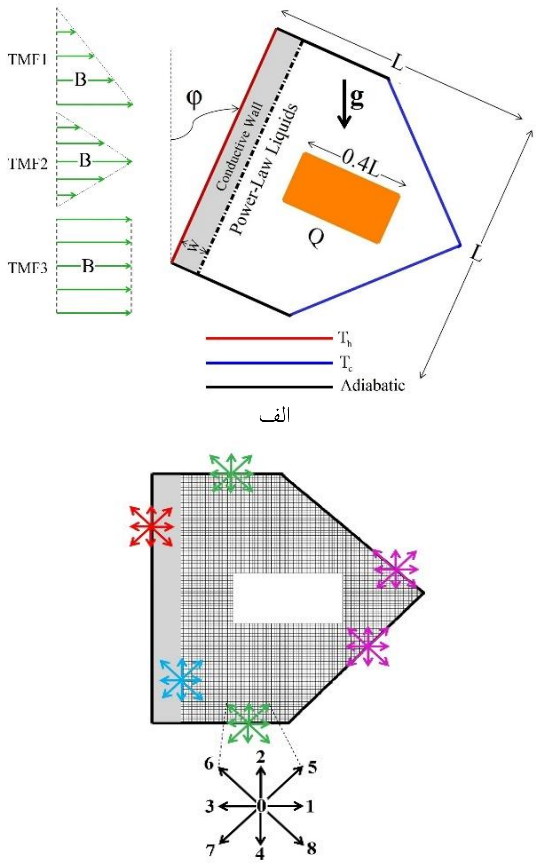
۱۵- شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال و بررسی مقدار آنتروپی تولید شده تحت میدان مغناطیسی یکنواخت درون محفظه L شکل با استفاده از LBM توسط فرهی و همکاران [49] در سال ۲۰۲۲: ۱- کنترل جریان و انتقال حرارت با تغییر در طراحی هندسه محفظه، ۲- تأثیر بیشتر تغییر عدد هارتمن بر مقدار انتقال حرارت و آنتروپی تولید شده در اعداد رایلی بالاتر از ۱۰۵، ۳- ثابت ماندن عدد بجان با افزایش عدد هارتمن در حالت کم بودن اثرات جابجایی (اعداد رایلی پایین)، ٤- عدم ارزیابی اثرات جذب/تولید گرما و میدان مغناطیسی غیریکنواخت در شکل-های مختلف بر مقدار انتقال حرارت و اثرات نسبت هدایت حرارتی جامد-سیال در تولید آنتروپی.

بررسی و تحلیل انتقال حرارت درون محفظه‌های شکل‌دار به دلیل کاربردهای گسترده از جمله طراحی خنک‌کننده‌های الکترونیکی که باید حرارت تولید شده را برای در امان ماندن از خرابی دفع کنند، بسیار با اهمیت است. طبق مطالعات صورت گرفته مشخص می‌شود که اثر جذب/تولید گرما بر مقدار آنتروپی تولید شده در انتقال حرارت دوگانه برای سیال غیرنیوتنی تاکنون بررسی نشده است. از آنجایی که میدان‌های مغناطیسی اعمالی چه به صورت خواسته برای رسیدن به هدفی خاص و یا به صورت ناخواسته همواره به شکل یکنواخت اعمال نمی‌شوند، در کار حاضر این مورد لحاظ شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است که یکی از ویژگی‌های بارز کار حاضر به شمار می‌رود. دلیل استفاده از روش لتیس بولتزمن در این شبیه‌سازی، سهولت در اعمال شرایط مرزی بین سطح جامد و سیال است که این عامل دلیل ارجحیت این روش نسبت به سایر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی در مدل‌سازی جریان سیال است.

مدل ریاضی

بیان مسأله. فرآیند انتقال حرارت دوگانه ناشی از جابجایی طبیعی سیال رسانای الکتریکی با مدل توانی درون محفظه دو بعدی با ابعاد L×L که در کار حاضر نظر گرفته شده است، در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. به منظور نشان دادن این مطلب که آیا با روش‌های ساده و کم هزینه مثل تغییر موقعیت

قرارگیری محفظه تا چه حد می‌توان بر جریان و مقدار انتقال حرارت اثر گذاشت، زاویه تمایلی با نماد φ برای محفظه در نظر گرفته شده است. بر اساس $\varphi=0$، دیواره‌های افقی، دیواره‌های مورب و دیواره عمودی محفظه به ترتیب آدیاباتیک، دارای دمای ثابت سرد و گرم در نظر گرفته شده‌اند. مانعی مستطیلی شکل با نسبت طول به ارتفاع ۲، در موقعیت $(0.3L, 0.4L)$ در دمایی حد فاصل دیواره‌های سرد و گرم $(\theta=0.5)$ درون محفظه تعبیه شده است. ضخامت دیوره رسانا که در مجاورت دیواره گرم قرار دارد و حرارت را به سیال منتقل می‌کند برابر $W=0.1L$ است. جذب/تولید گرمای یکنواختی با قدرت Q بر جریان سیال اثر می‌گذارد و میدان مغناطیسی در سه شکل مختلف از چپ به راست و عمود بر گرانش بر محفظه اثر می‌کند. جابجایی طبیعی بر اثر گرادیان چگالی ناشی از اختلاف دمای دیواره‌ها ایجاد می‌شود. فرضیاتی که در این شبیه‌سازی لحاظ شده است در جدول (۱) و پارامترهای مورد بررسی به همراه و مقادیر مربوطه در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۲ الف- نمایی از هندسه مسأله مورد بررسی و ب- نمونه‌ای از دامنه محاسباتی به همراه سرعت‌های گسسته شبکه

جدول ۱ فرضیات لحاظ شده در شبیه‌سازی حاضر

(۱)	جریان دو بعدی، رژیم جریان غیر قابل تراکم و پایا
(۲)	عدم وجود تشعشع حرارتی و اتلاف ویسکوز
(۳)	استفاده از تقریب بوزینسک برای چگالی
(۴)	سطوح غیر قابل نفوذ و عدم لغزش سیال روی سطوح
(۵)	اعمال میدان گرانش به صورت عمودی از بالا به پایین

جدول ۲ متغیرهای مورد بررسی در شبیه‌سازی حاضر به همراه مقادیر مربوطه

متغیر	مقدار
عدد هارتمن	۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰
نوع اعمال میدان مغناطیسی	TMF1, TMF2, TMF3
نسبت هدایت حرارتی	۰/۵، ۱ و ۱۰
عدد رایلی	$۱۰^{۳}$ و $۱۰^{۵}$
زاویه تمایل محفظه	−۹۰، ۰ و +۹۰
ضریب جذب/تولید گرما	−۱۰، ۰ و +۱۰
شاخص توانی سیال	۰/۷۵، ۰ و ۱/۲۵

معادلات حاکم. روابط مربوط به معادلات بقای جرم، مومنتوم،انرژی و تابع جریان بر اساس مشخصات ماکروسکوپیک طبق روابط (۱-۵) نوشته می‌شود [41].

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 u}{\partial^2 y}\right) ++\rho \mathbf{g}\beta(T\text{-}T_c)\sin\varphi \qquad (۲)$$

$$\rho\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 y}\right) +\rho \mathbf{g}\beta(T\text{-}T_c)\cos\varphi\text{-}\sigma B^2 v \qquad (۳)$$

$$u\frac{\partial T}{\partial X}+v\frac{\partial T}{\partial Y}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+\frac{Q}{\rho C_p}(T\text{-}T_c) \qquad (۴)$$

$$\psi(x,y)=\int u dy+\psi_0 \qquad (۵)$$

در رابطه (۴)، $Q>0$ و $Q<0$ به ترتیب تولید و جذب گرما را نشان می‌دهد. ویسکوزیته دینامیکی در مدل توانی به‌صورت رابطه (۶) بیان می‌شود [9]. همچنین متغیرهای بدون بعدی که در حل معادلات و ارائه نتایج از آن‌ها استفاده شده است، طبق رابطه (۷)

بیان می‌شوند. در روابط ارائه شده، n بیانگر شاخص توانی سیال در مدل توانی است که n=1، n<1 و n>1 به ترتیب سیال نیوتنی، سیال نازک‌شونده و سیال ضخیم‌شونده را نشان می‌دهد. ویسکوزیته دینامیکی سیال نیوتنی با μ_0 نشان داده می‌شود. ویسکوزیته سینماتیکی سیال غیرنیوتنی طبق رابطه (۸) بیان می‌شود که γ نرخ برش است که به‌صورت رابطه (۹) بیان می‌شود [43]. υ_0 بیانگر ویسکوزیته سینماتیکی سیال نیوتنی است.

$$\mu=\mu_0\left\{2\left[(\frac{\partial u}{\partial x})^2+(\frac{\partial v}{\partial y})^2\right]+(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y})^2\right\}^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (٦)$$

$$X=\frac{x}{L},\ Y=\frac{y}{L},\ U=\frac{uL}{\alpha\sqrt{Ra}},\ V=\frac{vL}{\alpha\sqrt{Ra}},$$
$$Pr=\frac{\upsilon_0 L^{2-n}}{\alpha^{2-n}},\ \theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},\ Ha=BL^n\sqrt{\frac{\sigma\alpha^{1-n}}{\mu_0}},$$
$$Ra=\frac{\beta\theta \mathbf{g} L^{2n+1}}{\upsilon_0\alpha^n},\ P=\frac{pL^2}{\rho Ra\alpha^2},\ HAPC=\frac{QL^2}{\rho C_p\alpha}, \quad (٧)$$
$$\alpha=\frac{\upsilon_0}{Pr},\ TCR=\frac{k_s}{k_f},\ \upsilon_0=\frac{\mu_0}{\rho}$$

$$\upsilon(\mathbf{x},t)=\upsilon_0|\gamma|^{(n-1)}=\frac{Pr}{Ra^{\frac{(2-n)}{2}}}|\gamma|^{(n-1)} \quad (٨)$$

$$\gamma_{ij}\equiv 0.5(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\ \text{and}\ |\gamma|=\sqrt{2\gamma_{ij}\gamma_{ij}} \quad (٩)$$

مجموع آنتروپی‌های تولیدی ناشی از انتقال حرارت، اصطکاک سیال و وجود میدان مغناطیسی، آنتروپی کل را به وجود می‌آورد که روابط آن در زیر ارائه شده است [23]. در روابط ارائه شده: $T_0=\frac{T_h+T_c}{2}$.

معادلات حاکم بدون بعد طبق روابط (۲۲-۱٤) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \quad (١٤)$$

$$U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+Pr\theta\sin\varphi+\frac{Pr}{Ra^{\frac{(2-n)}{2}}}\left[\frac{\partial}{\partial X}(2\chi\frac{\partial U}{\partial X})+\frac{\partial}{\partial Y}(\chi\frac{\partial U}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial Y}(\chi\frac{\partial V}{\partial X})\right] \quad (١٥)$$

$$U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+Pr\,\theta\cos\varphi-\frac{PrHa^2}{\sqrt{Ra}}V+\frac{Pr}{Ra^{\frac{(2-n)}{2}}}\left[\frac{\partial}{\partial X}(\chi\frac{\partial V}{\partial X})+\frac{\partial}{\partial Y}(2\chi\frac{\partial V}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial X}(\chi\frac{\partial U}{\partial Y})\right] \quad (١٦)$$

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}=\frac{1}{\sqrt{Ra}}(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2})+\frac{HAPC\theta}{\sqrt{Ra}} \quad (١٧)$$

$$\chi=|\gamma|^{(n-1)}=\left\{2\left[(\frac{\partial U}{\partial X})^2+(\frac{\partial V}{\partial Y})^2\right]+(\frac{\partial V}{\partial X}+\frac{\partial U}{\partial Y})^2\right\}^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (١٨)$$

$$S_T=S_T+S_F+S_F \quad (١٩)$$

$$S_T=[(\frac{\partial\theta}{\partial X})^2+(\frac{\partial\theta}{\partial Y})^2] \quad (٢٠)$$

$$S_F=\eta_1\chi[2((\frac{\partial U}{\partial X})^2+(\frac{\partial V}{\partial Y})^2)+(\frac{\partial U}{\partial Y}+\frac{\partial V}{\partial X})^2] \quad (٢١)$$

$$S_M=\eta_2 Ha^2V^2 \quad (٢٢)$$

معادلات روش لتیس بولتزمن برای میدان‌های جریان، دما و مغناطیسی. روش لتیس بولتزمن، روشی مبتنی بر تئوری جنبشی گازها بوده که در آن سیال به عنوان مجموعه‌ای از ذرات با سرعت‌های گسسته شده بر روی دامنه‌ای مربعی شکل در جهات مختلف حرکت می‌کنند. ذرات مستقر روی هر یک از گره‌ها، به سمت گره‌های مجاور در همسایگی خود در دو زمان مختلف حرکت می‌کنند. روش لتیس بولتزمن متشکل از دو مرحله برخورد و جاری شدن است و در کار حاضر از روشی که توسط مرجع [47] ارائه شده است، بهره برده شده است. در کار حاضر، از سه تابع توزیع f، g و h که به ترتیب مربوط به جریان، دما و مغناطیسی است، استفاده شده است. معادلات شبکه بولتزمن برای میدان‌های جریان، دما و مغناطیسی به ترتیب به صورت روابط زیر بیان می‌شود [38]:

$$f_i(\mathbf{x}+\mathbf{c}_i,t+1)=f_i(\mathbf{x},t)-\frac{\left[f_i(\mathbf{x},t)-f_i^{eq}(\mathbf{x},t)\right]}{\tau^*}+\mathbf{c}_i\mathbf{F}_i \quad (٢٣)$$

$$\mathbf{F}_i=F_y=3\omega_i\rho\mathbf{g}\beta\theta-3\rho\omega_i\frac{Ha^2\upsilon(\mathbf{x},t)}{L^2}v \quad (٢٤)$$

$$g_i\left(\mathbf{x}+\mathbf{c}_i,t+1\right)=g_i\left(\mathbf{x},t\right)-\frac{\left[g_i\left(\mathbf{x},t\right)-g_i^{eq}\left(\mathbf{x},t\right)\right]}{\tau^{**}}+\frac{Q}{(\rho C_p)}(T-T_c) \quad (۲۵)$$

$$h_i\left(\mathbf{x}+\mathbf{e}_i,t+1\right)=h_i\left(\mathbf{x},t\right)-\frac{\left[h_i\left(\mathbf{x},t\right)-h_i^{eq}\left(\mathbf{x},t\right)\right]}{\tau^{***}} \quad (۲۶)$$

توابع توزیع تعادلی مربوط به میدان های جریان، دما و مغناطیسی به ترتیب طبق روابط (۳۰-۲۷) بیان می‌شوند [4].

$$f_i^{eq}=\rho\omega_i\left(1+3\mathbf{c}_i.\mathbf{u}+\frac{9}{2}\left(\mathbf{c}_i.\mathbf{u}\right)^2-\frac{3}{2}\mathbf{u}.\mathbf{u}\right)+\frac{3\omega_i}{2}\left(\frac{\mathbf{c}_i^2B^2}{2}-\left(\mathbf{c}_i.B\right)\right) \quad (۲۷)$$

$$g_i^{eq}=\omega_i T\left(1+3\mathbf{c}_i.\mathbf{u}\right) \quad (۲۸)$$

$$h_{ix}^{eq}=\lambda_i\left(B_x+3\mathbf{e}_{ix}(vB_x-uB_y)\right) \quad (۲۹)$$

$$h_{iy}^{eq}=\lambda_i\left(B_y+3\mathbf{e}_{iy}(uB_y-vB_x)\right) \quad (۳۰)$$

در روابط فوق، $\mathbf{c}_i$ سرعت گسسته شده ذرات در جهات مختلف شبکه و ω_i ضرایب وزنی در مدل D_2Q_9 است که در روابط (۳۱ و ۳۲) ارائه شده است. λ_i ضرایب وزنی مربوط به میدان مغناطیسی است که در پنج جهت طبق رابطه (۳۳ و ۳٤) بیان می‌شود [27].

$$\begin{aligned}&\mathbf{c}_0=0\\&\mathbf{c}_{1-4}=[\cos(\frac{(i-1)\pi}{2}),\sin(\frac{(i-1)\pi}{2})]\\&\mathbf{c}_{5-8}=\sqrt{2}[(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2}+\frac{\pi}{4}),\sin(\frac{(i-5)\pi}{2}+\frac{\pi}{4})]\end{aligned} \quad (۳۱)$$

$$\omega_0^f=4/9,\ \omega_{1-4}^f=1/9,\ \omega_{5-8}^f=1/36 \quad (۳۲)$$

$$\begin{aligned}&\mathbf{e}_0=0,\ \mathbf{e}_1=(1,0),\ \mathbf{e}_2=(0,1),\\&\mathbf{e}_3=(-1,0),\ \mathbf{e}_4=(0,-1)\end{aligned} \quad (۳۳)$$

$$\lambda_0=1/3 \text{ and } \lambda_{1-4}=1/6 \quad (۳٤)$$

زمان آسایش مربوط به میدان‌های جریان، دما و مغناطیسی به ترتیب طبق روابط (۳۷-۳۵) بیان می‌شوند. خواص ماکروسکوپیک بر اساس توابع توزیع شرح داده شده، به صورت رابطه (۳۸) است.

$$\tau^*=3\upsilon+0.5 \quad (۳۵)$$

$$\tau^{**}=3\alpha+0.5 \quad (۳۶)$$

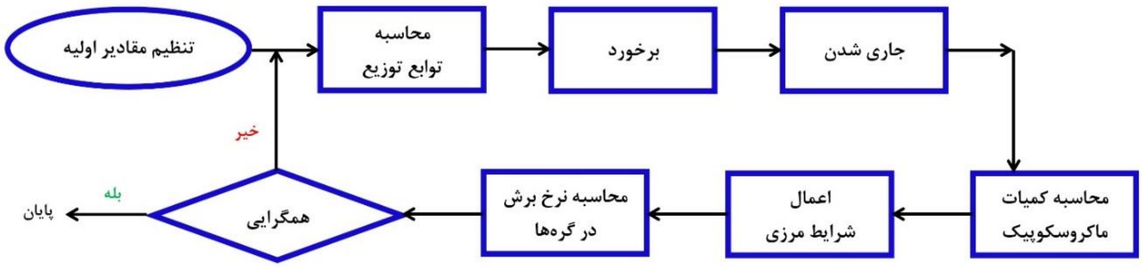
$$\tau^{***}=3\eta+0.5 \quad (۳۷)$$

$$\rho=\sum f_i,\ \mathbf{u}=\frac{1}{\rho}\sum\mathbf{c}_i f_i,\ T=\sum g_i,\ B_x=\sum h_{ix},\ B_y=\sum h_{iy},\ \rho=\sum_{i=0}^{8}f_i \quad (۳۸)$$

شرایط مرزی. اعمال شرایط مرزی، یکی از مهمترین قسمت‌های شبیه‌سازی عددی به شمار می‌رود. در روش لتیس بولتزمن، توابع توزیع خارج از دامنه طی مرحله جاری شدن، مشخص و معلوم هستند. توابع توزیع مجهول داخل دامنه نیز بر طبق مدل کمانه کردن محاسبه می‌شوند [23]. به ازای $\varphi=0$ و با توجه به شکل (۲-ب)، شرایط مرزی در روش لتیس بولتزمن برای میدان جریان به صورت روابط (٤٤-۳۹) و برای میدان دما طبق روابط (٤٥-٤۹) نوشته می‌شود. شرایط مرزی بر حسب متغیرهای ماکروسکوپیک به صورت رابطه (۵۰) می‌باشد.

برای حل به روش لتیس بولتزمن، الگوریتمی در نظر گرفته می‌شود که در شکل (۳) ارائه شده است.

مقدار آنتروپی تولیدی کل نیز طبق رابطه (۵۱) به دست می‌آید. عدد بیجان که معیاری است برای تعیین درصد آنتروپی ناشی از انتقال حرارت از آنتروپی تولیدی کل، طبق رابطه (۵۲) محاسبه می‌شود [9]. عدد بیجان بزرگتر از ۰/۵ بیان می‌دارد که انتقال حرارت، بیشترین سهم را در تولید آنتروپی دارد. عدد ناسلت متوسط که معیاری از میزان انتقال حرارت است، به ازای $\varphi=0$ به صورت رابطه (۵۳) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که معیار همگرایی برای اتمام محاسبات طبق رابطه (۵٤) است. در این رابطه Γ متغیر عمومی (U, V, θ)، b و $b+1$ مراحل زمانی قدیم و جدید و N و M به ترتیب تعداد گره‌ها در راستای x و y را نشان می‌دهند.



شکل ۳ الگوریتم حل به روش لتیس بولتزمن

(۳۹) دیواره افقی بالایی $f_4(i,L)=f_2(i,L),\ f_7(i,L)=f_5(i,L),\ f_8(i,L)=f_6(i,L)$

(۴۰) دیواره افقی پایینی $f_2(i,0)=f_4(i,0),\ f_5(i,0)=f_7(i,0),\ f_6(i,0)=f_8(i,0)$

(۴۱) دیواره مورب بالایی $f_4(i,j)=f_2(i,j),\ f_7(i,j)=f_5(i,j),\ f_3(i,j)=f_1(i,j)$

(۴۲) دیواره مورب پایینی $f_2(i,j)=f_4(i,j),\ f_3(i,j)=f_1(i,j),\ f_6(i,j)=f_8(i,j)$

(۴۳) دیواره عمودی $f_2(i,j)=f_4(i,j),\ f_3(i,j)=f_1(i,j),\ f_6(i,j)=f_8(i,j)$

(۴۴) مرز بین جامد و سیال $f_1(W,j)=f_3(W,j),\ f_5(W,j)=f_7(W,j),\ f_8(W,j)=f_6(W,j)$

(۴۵) دیواره افقی بالایی $g_4(i,L)=f_4(i,L),\ g_7(i,L)=g_7(i,L),\ g_8(i,L)=g_8(i,L)$

(۴۶) دیواره افقی پایینی $g_2(i,0)=g_2(i,0),\ f_5(i,0)=g_5(i,0),\ g_6(i,0)=g_6(i,0)$

(۴۷) دیواره مورب بالایی $g_4(i,j)=-g_2(i,j),\ g_7(i,j)=-g_5(i,j),\ g_3(i,j)=-g_1(i,j)$

(۴۸) دیواره مورب پایینی $g_2(i,j)=-g_4(i,j),\ g_3(i,j)=-g_1(i,j),\ g_6(i,j)=-g_8(i,j)$

(۴۹) دیواره عمودی

$$g_2(i,j)=(\omega(2)+\omega(4))g_4(i,j),\ g_3(i,j)=(\omega(2)+\omega(4))g_1(i,j),\ g_6(i,j)=(\omega(2)+\omega(4))g_8(i,j)$$

(۵۰)

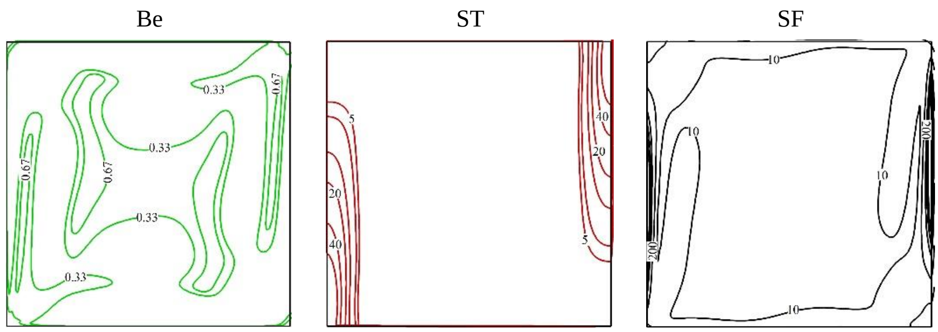
دیواره‌های افقی $U=V=0,\ \frac{\partial\theta}{\partial Y}=0$

دیواره‌های مورب $U=V=0,\ \theta=0$

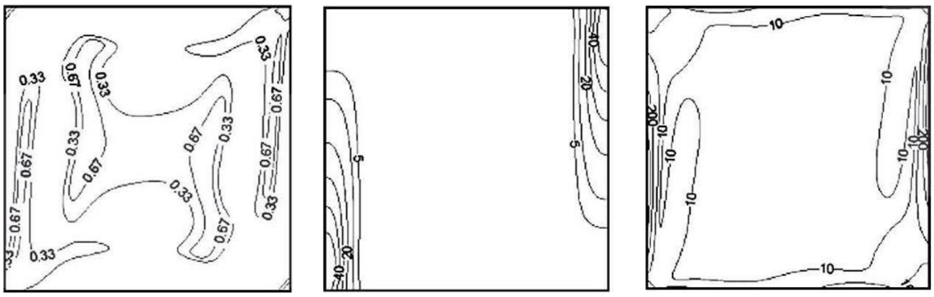
دیواره عمودی سمت چپ $U=V=0,\ \theta=1$

مرز بین جامد و سیال $TCR(\frac{\partial\theta}{\partial X})_f=(\frac{\partial\theta}{\partial X})_s$

کار حاضر

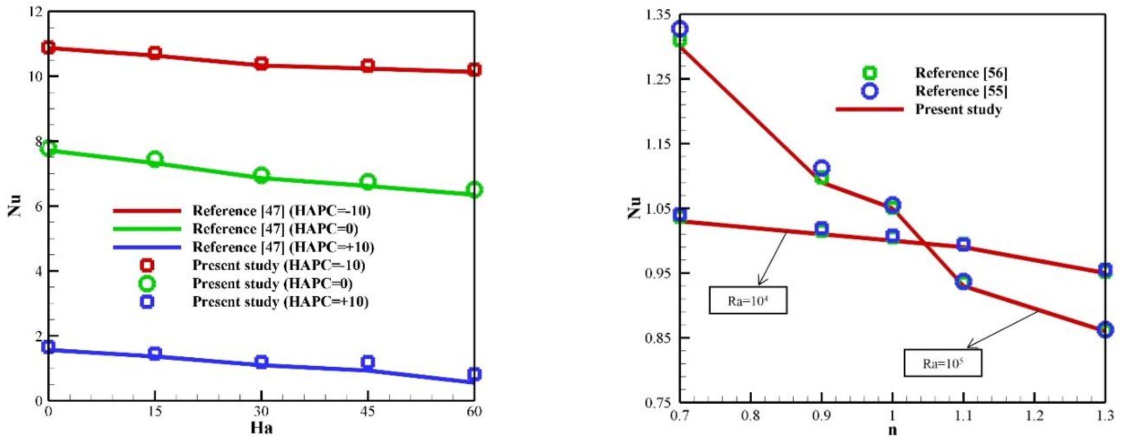


مرجع [50]



شکل ٤ مقایسه کانتورهای آنتروپی بین کار حاضر و مرجع [50]

(الف) (ب)



شکل ٥ مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مراجع

صحت‌سنجی و استقلال حل از شبکه انتخابی

یکی از الزامات در شبیه‌سازی‌های عددی، اعتبارسنجی کار حاضر با مطالعات معتبر قبلی است. به این منظور و برای راستی‌آزمایی کد نوشته شده به زبان فرترن برای تعیین مقدار آنتروپی، کار حاضر به صورت کیفی با مرجع [50] در شکل (٤) مقایسه شده است. همچنین برای صحت‌سنجی کار حاضر در مواجهه با جریان سیال غیرنیوتنی، کار حاضر با مراجع [51,52] در قالب عدد ناسلت متوسط در شکل (٥–الف) مقایسه شده است. برای اطمینان از درستی نتایج به دست آمده ناشی از جابجایی طبیعی تحت اثر میدان مغناطیسی و جذب/تولید گرما، عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم محفظه بین کار حاضر و مرجع [47] در شکل (٥–ب) مقایسه شده است.

$$S=\frac{\int s\,dV}{V} \qquad (٥١)$$

$$Be=\frac{s_T}{s} \qquad (٥٢)$$

$$Nu=\frac{1}{L}\int_0^1 -\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)_{X=W} dY \qquad (٥٣)$$

$$Error=\frac{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left|\Gamma^{b+1}-\Gamma^{b}\right|}{\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\left|\Gamma^{b}\right|}\le 10^{-8} \qquad (٥٤)$$

مشاهده می‌شود که نتایج حاصل شده از مطالعه عددی حاضر، تطابق مناسبی با نتایج مراجع دارد و می‌توان از درستی نتایج به دست آمده، اطمینان حاصل نمود.

به منظور سنجش حساسیت حل به شبکه انتخابی، عدد ناسلت متوسط با لحاظ کردن متغیرهای تأثیرگذار در جدول (٣) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود می‌توان با انتخاب شبکه ١٠٠×١٠٠ مسأله را با صرفه‌جویی در وقت و هزینه و با دقت بالا، حل نمود.

تحلیل نتایج

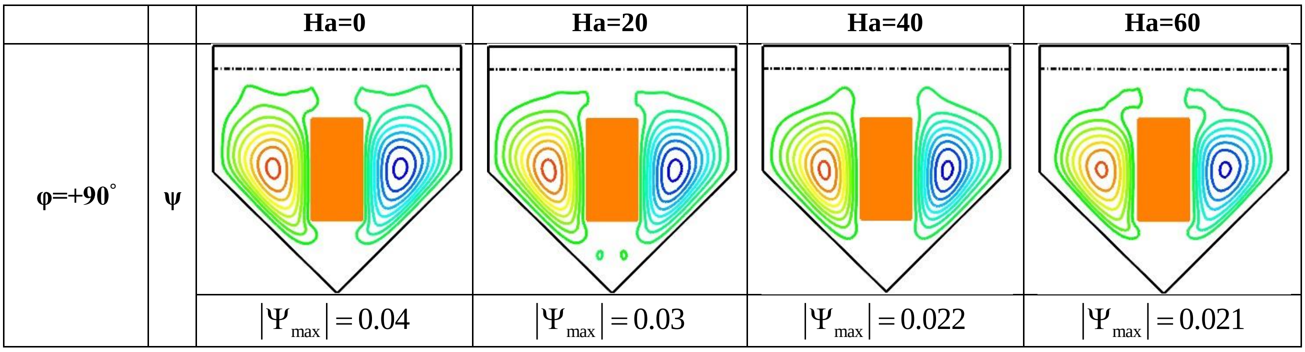
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی به ازای تغییر متغیرهای ارائه شده در جدول (٢) در قالب جداول، نمودارها و کانتورهای خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت ارائه و تحلیل می‌شود. لازم به ذکر است از آنجایی که در

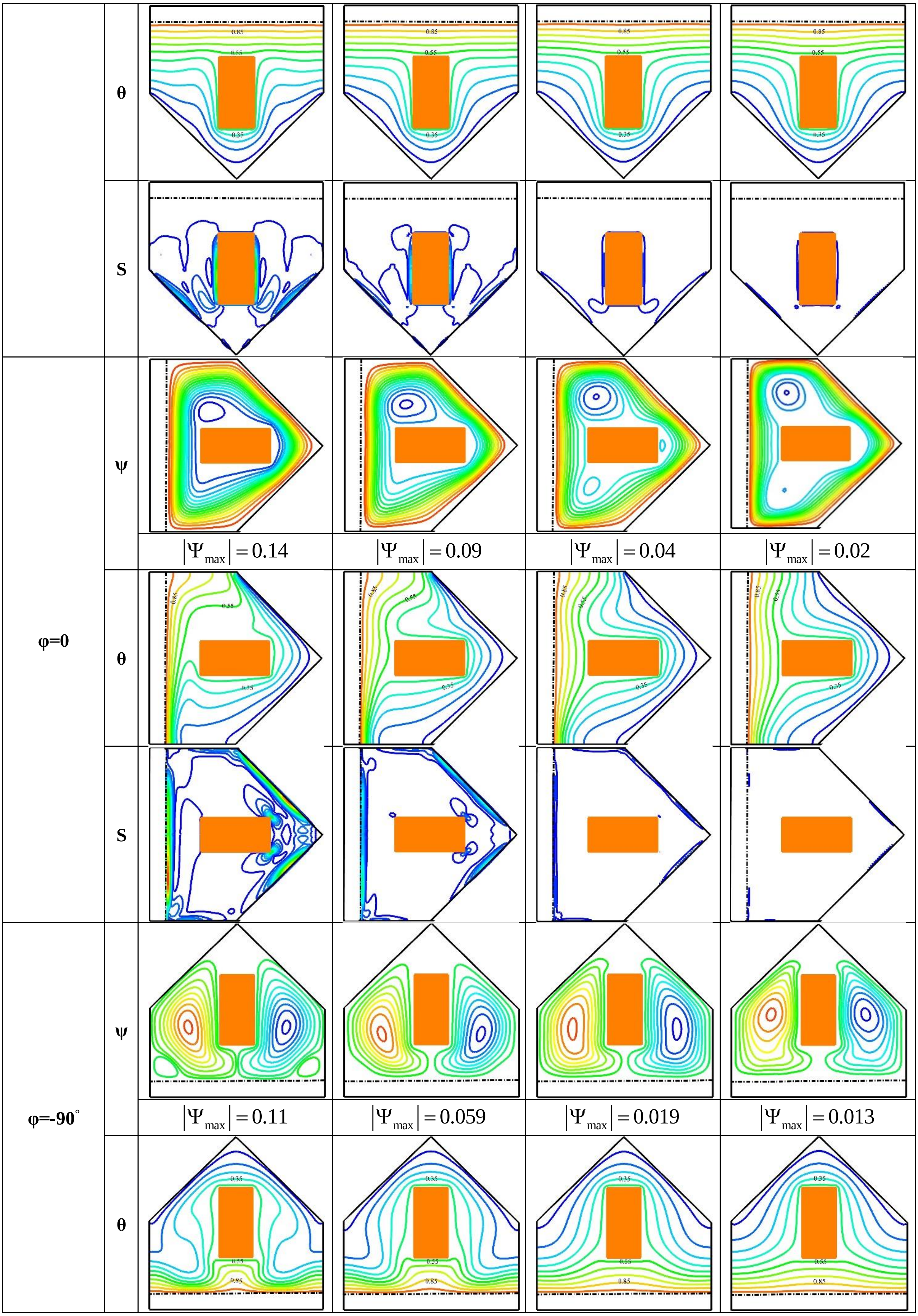
کاربردهای صنعتی و واقعی از سیالات با اعداد پرانتل بالا استفاده می‌شود، محاسبات به ازای عدد پرانتل ۵۰ انجام شده است [35].

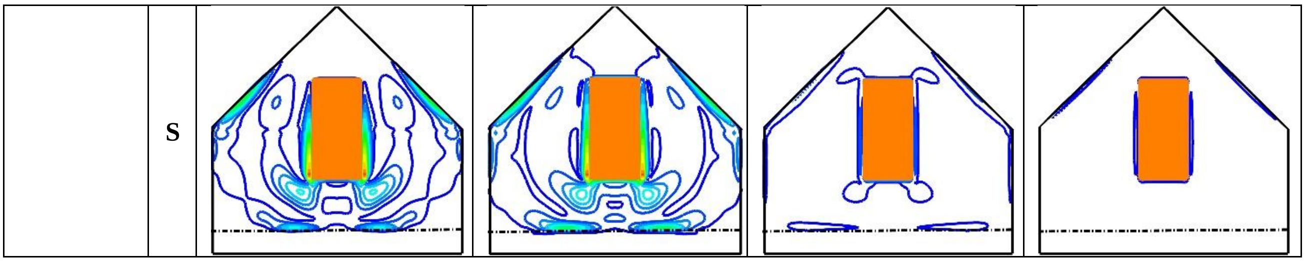
به منظور نشان دادن اثر افزایش قدرت میدان مغناطیسی و تغییر زاویه تمایل بر جریان سیال درون محفظه، خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت در شکل (٦) نشان داده شده است. چند نکته قابل ذکر است: ۱- در تمامی حالات افزایش عدد هارتمن منجر به کم شدن قدرت جریان می‌شود. زیرا در این حالت متوسط نیروی مقاوم لورنز اثر کننده بر جریان سیال، افزایش می‌یابد. این نیرو با توجه به معادله (۳)، خلاف نیروی گرانش عمل می‌کند. ۲- افزایش عدد هارتمن به طور محسوس منجر به کاهش تراکم خطوط آنتروپی می‌شود به نحوی که به ازای Ha=60، تقریبا خطوط آنتروپی مشاهده نمی‌شود. ۳- افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش انحنای خطوط همدما می‌شود و از تراکم خطوط در مجاورت دیواره جامد می‌کاهد. ٤- با توجه به نحوه قرارگیری دیواره گرم با توجه به تغییر زاویه تمایل محفظه مشاده می‌شود که در φ=0 برخلاف دو زاویه دیگر، گردابه‌ای واحد درون محفظه شکل می‌گیرد که قدرت چرخش آن بیشتر از دو حالت دیگر است. در دو زاویه دیگر، گردابه‌هایی یکسان با قدرت‌های برابر که خلاف هم چرخش دارند درون محفظه شکل می‌گیرند. به عنوان نمونه قدرت جریان در غیاب میدان مغناطیسی در φ=0 به ترتیب در حدود ۷۲ و ۲۱ درصد بیشتر از زاویه ۹۰+ و ۹۰- درجه است. همچنین با توجه به بشینه مقدار خطوط جریان، بیشترین کاهش قدرت جریان با افزایش عدد هارتمن برای φ=0 قابل مشاهده است. نکته حائز اهمیت این است که به ازای Ha>40 قدرت جریان و الگوی خطوط همدما برای φ=+90° تغییر نمی‌کند. ۵- با توجه به خطوط آنتروپی، بر خلاف زوایای ۹۰- و ۹۰+ که بیشترین تراکم خطوط در مجاورت مانع گرمازا دیده می‌شود در φ=0 بیشترین برگشت ناپذیری در مجاورت دیواره‌های مورب و در نزدیکی دیواره جامد دیده می‌شود، جایی که بیشترین گرادیان سرعت وجود دارد.

جدول ۳ عدد ناسلت متوسط به ازای شبکه با ابعاد مختلف در **$HAPC = 0, TMF2, Ra = 10^5, TCR = 10, \varphi = 0$**

		Mesh size	60×60	80×80	100×100	120×120	140×140
Ha=0	n=0.75	Nu	۳/۴۹	۳/۶۳	۳/۷۳	۳/۷۸	۳/۸۱
		Error (%)	-	۴/۰۱	۲/۷۵	۱/۳۵	۰/۷۹
		$\lvert\Psi_{max}\rvert$	۰/۱۳۵	۰/۱۴۱	۰/۱۴۵	۰/۱۵۱	۰/۱۵۸
	n=1.25	Nu	۲/۹۱	۲/۹۷	۳/۰۱	۳/۰۳۵	۳/۰۴۷
		Error (%)	-	۱/۹۵	۱/۳۱	۰/۹	۰/۴
		$\lvert\Psi_{max}\rvert$	۰/۰۸۳	۰/۰۸۴	۰/۰۸۵	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶
Ha=60	n=0.75	Nu	۲/۳۳۵	۲/۴۱	۲/۴۵	۲/۴۷	۲/۴۸
		Error (%)	-	۳/۲	۱/۶۵	۰/۹۱	۰/۵۱
		$\lvert\Psi_{max}\rvert$	۰/۰۵۳	۰/۰۵۴	۰/۰۵۶	۰/۰۵۸	۰/۰۵۹
	n=1.25	Nu	۲/۶۸	۲/۷۱	۲/۷۳	۲/۷۴	۲/۷۴
		Error (%)	-	۱/۰۵	۰/۷۳	۰/۴۵	۰
		$\lvert\Psi_{max}\rvert$	۰/۰۶۱۵	۰/۰۶۲۵	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳




θ
S
Ψ
$|\Psi_{max}| = 0.14$
$|\Psi_{max}| = 0.09$
$|\Psi_{max}| = 0.04$
$|\Psi_{max}| = 0.02$
φ=0
θ
S
Ψ
φ=-90°
$|\Psi_{max}| = 0.11$
$|\Psi_{max}| = 0.059$
$|\Psi_{max}| = 0.019$
$|\Psi_{max}| = 0.013$
θ



شکل ٦ خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و زاویه تمایل محفظه
در $HAPC = 0, TMF3, Ra = 10^5, n = 0.75, TCR = 50$

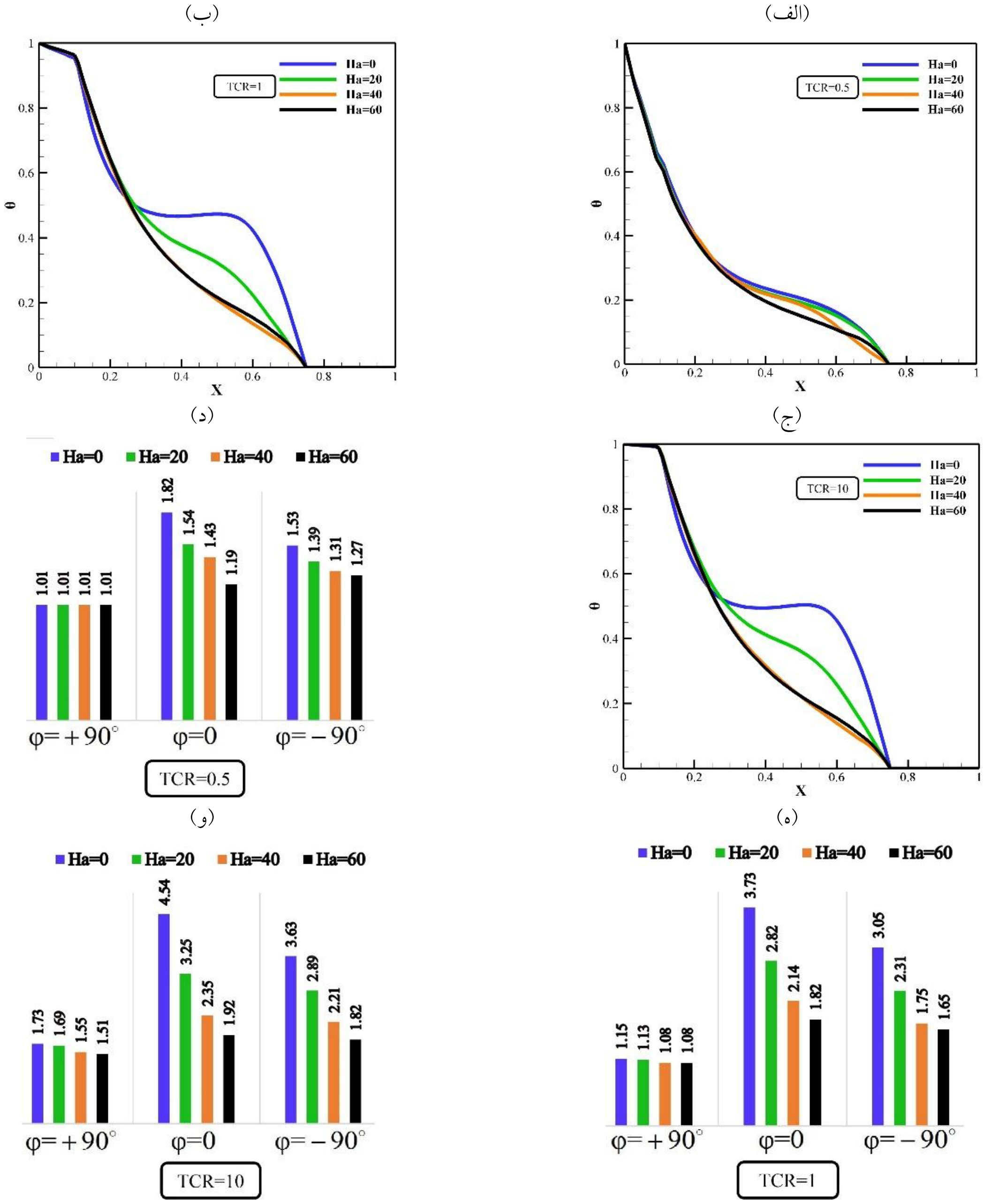
با توجه به شکل (۷) در قسمت‌های (الف) تا (ج) که دمای بدون بعد به ازای تغییرات نسبت هدایت حرارتی و عدد هارتمن را نشان می‌دهد، نکاتی قابل بیان است: ۱- هر اندازه نسبت هدایت حرارتی افزایش یابد، تغییر فرآیند انتقال حرارت از هدایت به جابجایی مشهودتر می‌شود. به ازای TCR=0.5، در طول X، پروفیل دما تقریبا خطی است ولی به ازای $TCR \geq 1$ دیده می‌شود که پروفیل دما در مرکز محفظه افقی شده که نشان از بیشتر شدن اثرات جابجایی دارد. در طول دیواره جامد که حرارت از دیواره گرم به سیال منتقل می‌شود، طبق قانون هدایت فوریه دیده می‌شود که هر چه نسبت هدایت حرارتی افزایش یابد، پروفیل دما به حالت افقی نزدیک‌تر می‌شود. ۲- افزایش عدد هارتمن منجر می‌شود که انحنای پروفیل دما از حالت افقی خارج شده و به صورت خطی تبدیل شود که نشان از کم شدن اثرات جابجایی دارد و به ازای Ha>40 تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود. نکته با اهمیت این است که در TCR=0.5 که هدایت فرآیند غالب انتقال حرارت است، اثر افزایش قدرت میدان مغناطیسی بسیار ناچیز است. با توجه به شکل (۷) در قسمت‌های (د) تا (و) که عدد ناسلت متوسط را به ازای تغییرات نسبت هدایت حرارتی، عدد هارتمن و زاویه تمایل محفظه نشان می-دهد: ۱- کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط در زاویه ۹۰+ درجه به دست می‌آید. زیرا در این حالت منبع گرمایی در بالا و دیواره سرد در پایین قرار دارد و در این حالت کمترین اثرات جابجایی قابل مشاهده است و فرآیند اصلی انتقال حرارت، هدایت است. در مقایسه زوایای ۰ و ۹۰- درجه نیز بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به φ=0 است زیرا در این حالت محفظه از دیواره جانبی تحت گرمایش قرار می‌گیرد. در محفظه‌هایی که از سطح جانبی گرم می‌شوند، با ایجاد اختلاف دمای کوچک، پدیده جابجایی اتفاق می‌افتد. اما محفظه‌هایی که از سطوح بالا و پایینی گرمایش دارند، برای اینکه اثرات جابجایی مشاهده شود باید اختلاف دما به مقدار بحرانی برسد. ۲- افزایش نسبت هدایت حرارتی منجر به افزایش مقدار عدد ناسلت متوسط می‌شود که این اثر برای φ=+90° نسبت به دو زاویه دیگر بسیار کمتر است. به عنوان نمونه در Ha=0 افزایش نسبت هدایت حرارتی از ۰/۵ تا ۱۰ به ترتیب منجر به افزایش حدود ۷۰، ۱۵۰ و ۹۹ درصدی عدد ناسلت برای زوایای ۹۰+، ۰ و ۹۰- درجه می‌شود. ۳- افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن از قدرت جریان و گرادیان دما در مجاورت دیواره‌ها، عدد ناسلت متوسط را کاهش می‌دهد. تنها یک استثنا وجود دارد و آن در φ=+90° به ازای نسبت هدایت حرارتی ۰/۵ است که میدان مغناطیسی هیچ اثری در مقدار عدد ناسلت ندارد. زیرا در این حالت هدایت حرارتی غالب است. ٤- هر اندازه نسبت هدایت حراتی بیشتر شود، اثر میدان مغناطیسی مشهودتر است. در حالت کلی کمترین تأثیر میدان مغناطیسی در حالتی است که منبع گرمایی در بالا قرار گرفته باشد.

با توجه به جدول (٤) چند نکته قابل بیان ا ست: ۱- افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش مقدار آنتروپی تولیدی می شود. اگر چه شـــاید این‌گونه به نظر برســـد که افزایش قدرت میدان مغناطیســـی با توجه به رابطه (۱۳) آنتروپی را افزایش می‌دهد، ولی باید توجه دا شت از آنجایی که افزایش عدد هارتمن سبب کاهش ســـرعت و گرادیان‌های ســـرعت می‌شـــود (طبق رابطه (۱۲))، پس مجموع این عوا مل را با ید مد نظر داشـــت. ۲- بیشترین مقدار آنتروپی تولید شده و اثر میدان مغناطیسی مربوط به حالتی اســـت که محفظه از دیواره جانبی تحت گرمایش قرار می‌گیرد. بـه عنوان نمونـه در TCR=10 و در غیـاب میـدان مغناطیـسی مقدار آنتروپی برای φ=0 به ترتیب در حدود ١٤ و ٥ در صد بیـشتر از زوایای ۹۰+ و ۹۰- درجه ا ست. ۳- با افزایش ن سبت هدایت حرارتی، به دلیل افزایش سهم انتقال حرارت در

تولید آنتروپی، آنتروپی تولیدی کل تا حدود ۳۲ درصد افزایش می‌یابد.

مطابق با شکل (۸) دیده می شود که سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی (عدد بجان) برای φ=+90° بیشتر از دو زاویه دیگر است، در حالی که بیشترین سهم اصطکاک سیال در تولید آنتروپی متعلق به φ=0 است. نکته حائز اهمیت این است که سهم میدان مغناطیسی در تولید آنتروپی با توجه به زاویه قرارگیری محفظه متغیر است به نحوی که بیشترین سهم مربوط به حالتی است که φ=0 است.

شکل (۹) قسمت (الف) و (ب) خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت ناشی از حضور میدان مغناطیسی را به ترتیب برای سیال نازک‌شونده و ضخیم شونده به ازای تغییرات نسبت هدایت حرارتی و ضریب جذب/تولید گرما نشان می‌دهد.

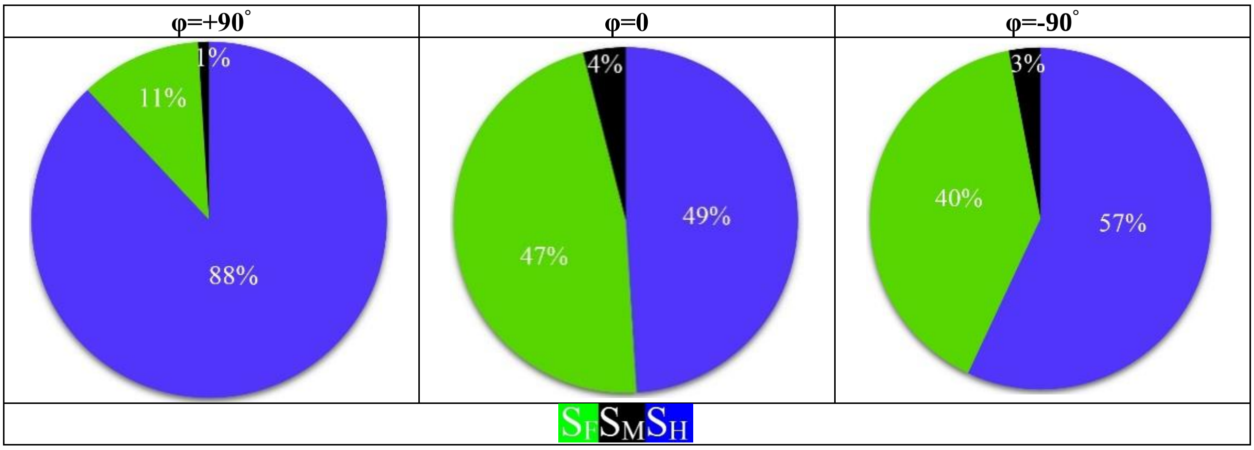


شکل ۷ (الف) تا (ج) دمای بدون بعد به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و نسبت هدایت حرارتی برای $\varphi = 0$ و (د) تا (و) عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن، نسبت هدایت حراتی و زاویه تمایل محفظه در $\mathbf{HAPC = 0, TMF3, Ra = 10^5, n = 0.75}$

جدول ٤ مقدار انتروپی تولید شده به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن، نسبت هدایت حرارتی و زاویه تمایل محفظه

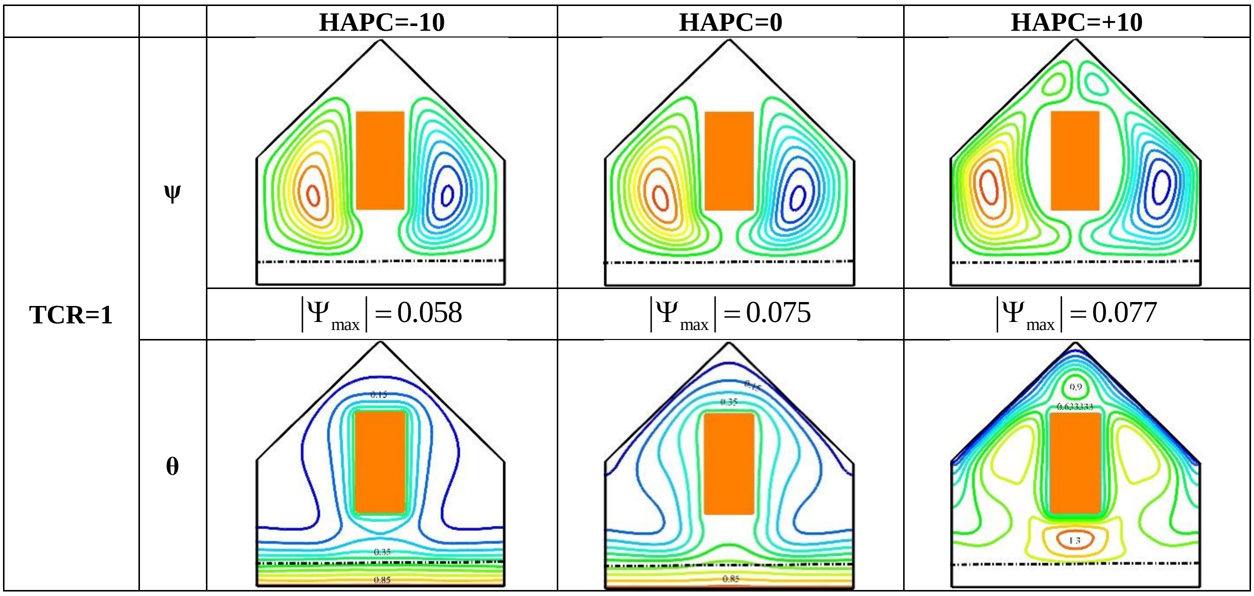
در $HAPC = 0, TMF3, Ra = 10^5, n = 0.75$

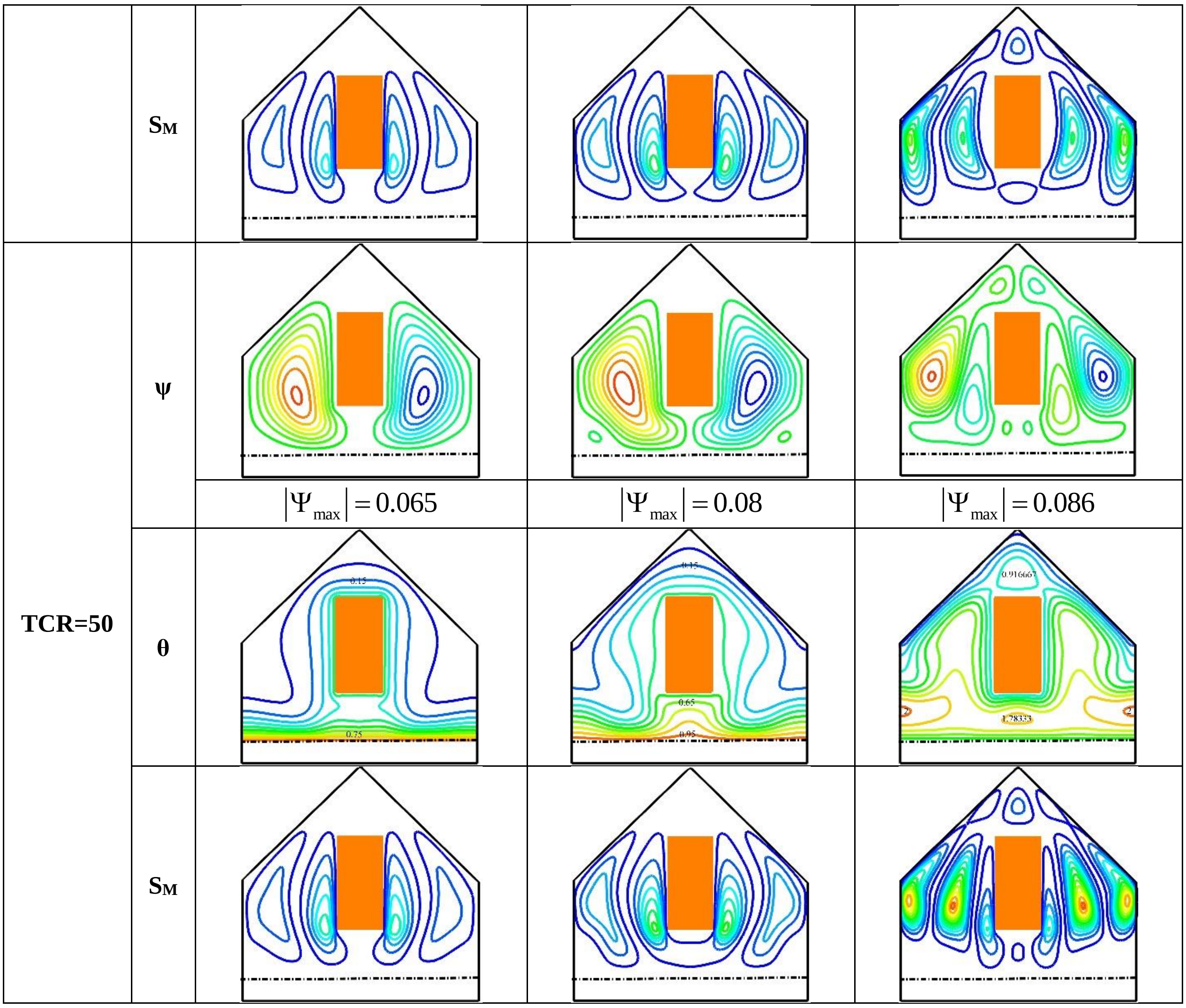
	TCR=0.5			TCR=1			TCR=10		
	φ=+90°	φ=0	φ=-90°	φ=+90°	φ=0	φ=-90°	φ=+90°	φ=0	φ=-90°
Ha=0	٢٩/١٥	٣٢/٧٥	٣١/٨٥	٣٨/٠٥	٤١/٥٥	٤٠/٥٧	٣٨/١٥	٤٤/٢٥	٤٢/٠٥
Ha=20	٢٨/٦٥	٣١/٧٥	٣١/٢١	٣٧/٢٥	٤٠/٥٤	٣٩/٣٥	٣٧/٥٥	٤٢/١١	٣٩/٩٣
Ha=40	٢٧/٩٥	٣٠/٤٥	٢٩/٩٥	٣٦/١٥	٣٨/٦٥	٣٧/٣٢	٣٦/٢٤	٣٨/٩٤	٣٨/١٨
Ha=60	٢٧/٩١	٢٩/١٥	٢٨/٩٨	٣٥/١٩	٣٦/١٥	٣٥/٣١	٣٥/٤٥	٣٦/٧٢	٣٦/٧٥



شکل ٨ درصد توزیع سهم هر یک از عوامل تولید آنتروپی تولیدی کل به ازای مقادیر مختلف زاویه تمایل محفظه

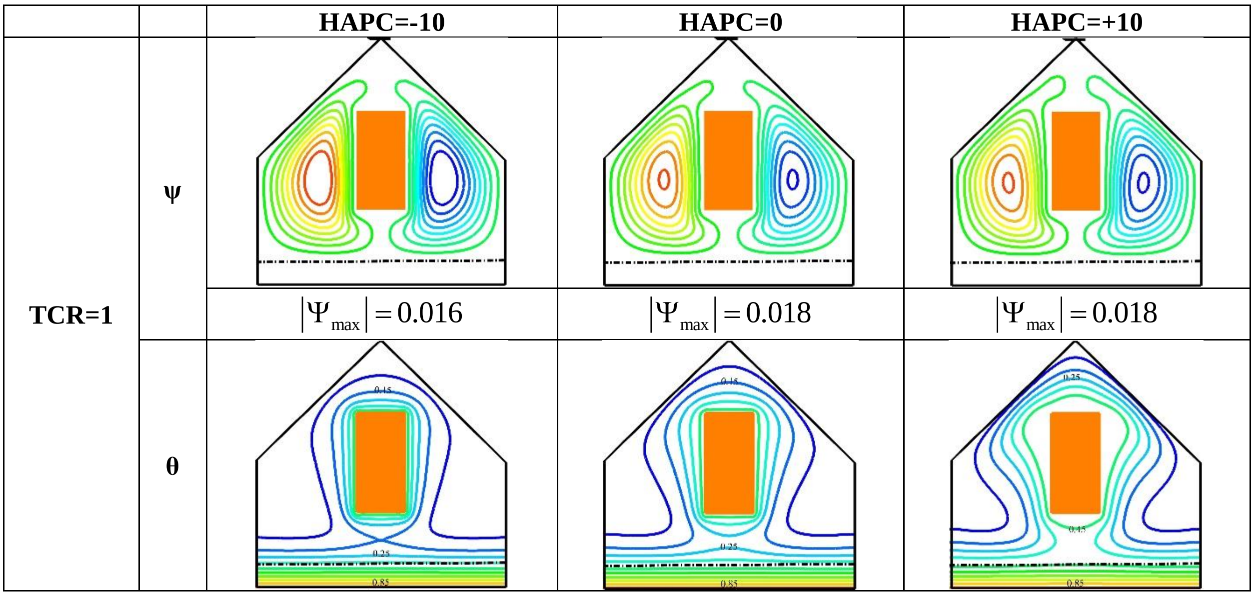
در $HAPC = 0, TMF3, Ra = 10^5, n = 0.75, TCR = 50, Ha = 20$

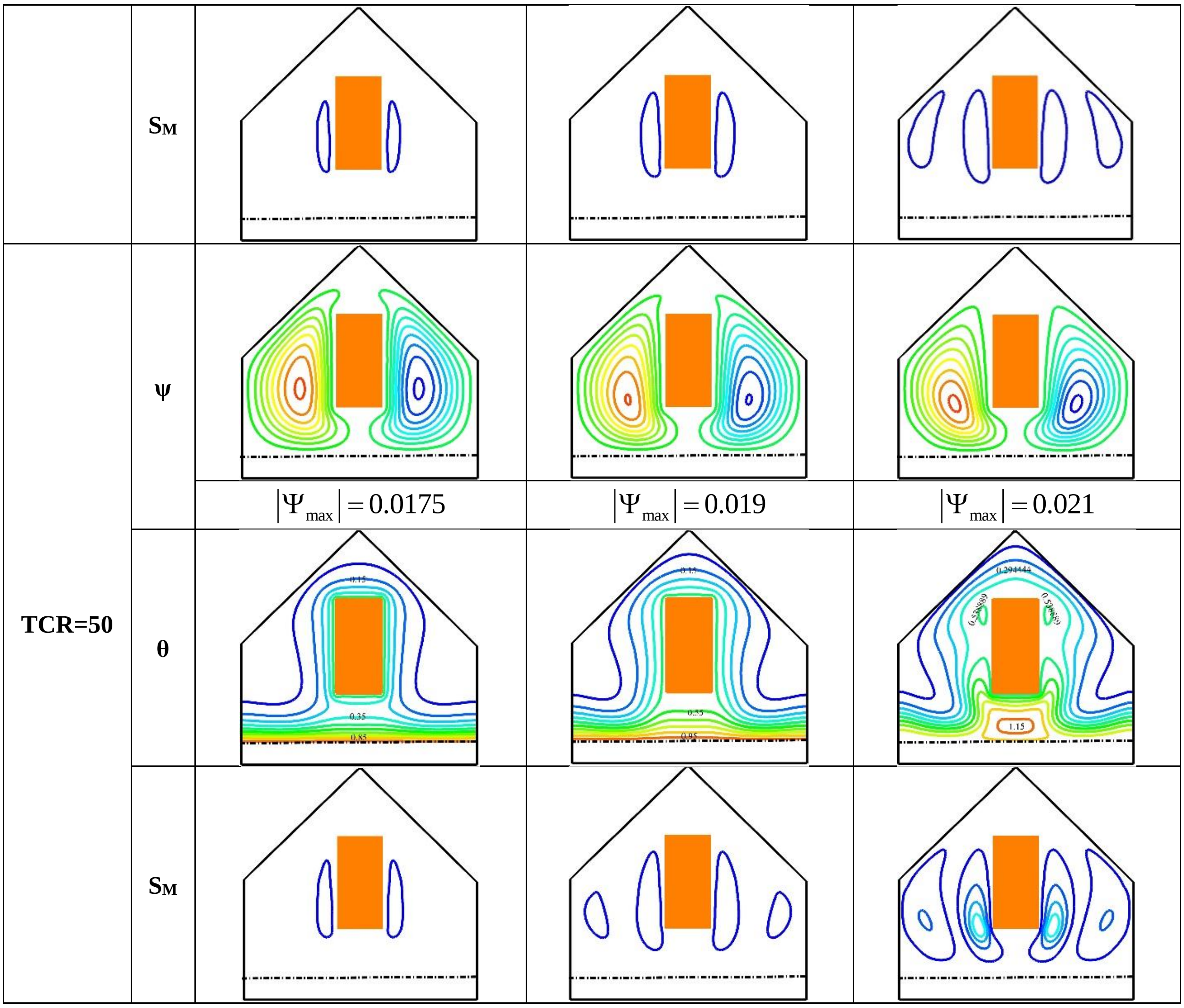




شکل ۹-الف) خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت به ازای مقادیر مختلف نسبت هدایت حرارتی و ضریب جذب/تولید گرما در

$n = 0.75$, TMF2, $Ra = 10^5$, $Ha = 30$, $\varphi = -90^o$





شکل ۹–ب خطوط جریان، خطوط همدما و خطوط آنتروپی ثابت به ازای مقادیر مختلف نسبت هدایت حرارتی و ضریب جذب/تولید گرما در

$$\mathbf{n = 1.25, TMF2, Ra = 10^5, Ha = 30, \varphi = -90^o}$$

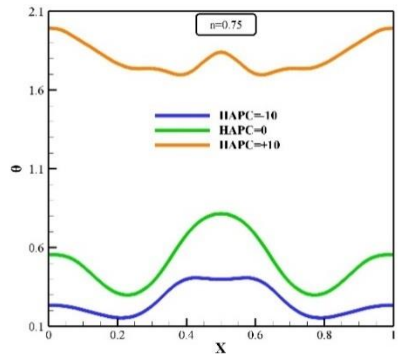
چند نکته نیاز به توضیح دارد: ۱– با توجه به گرمایش سیال از طریق کف محفظه، دو گردابه با قدرت یکسان و جهت خلاف گردش مخالف هم در دو طرف مانع شکل می‌گیرد. با توجه به افزایش ویسکوزیته ناشی از افزایش شاخص توانی سیال، سهولت حرکت و چرخش سیال درون محفظه کاهش می‌یابد و این امر منجر به کم شدن قدرت جریان می‌شود. قدرت جریان سیال نازک‌شونده به طور میانگین در حدود ٦۵ درصد بیشتر از سیال ضخیم‌شونده است. ۲– قدرت جریان با افزایش ضریب جذب/تولید گرما در هر دو نوع سیال افزایش می‌یابد ولی این اثر برای سیال نازک‌شونده در مجموع در حدود ۵۰ درصد بیشتر است. به ازای سیال نازک‌شونده و در حالت تولید گرما دیده می‌شود که الگوی جریان تغییر می‌کند و دو گردابه اصلی به چهار گردابه شکسته می‌شود که قدرت این گردابه‌ها در مجاورت دیواره‌های عمودی بیشتر است. ۳– افزایش ضریب جذب/تولید گرما منجر به تغییر مشهود در خطوط همدما به خصوص برای سیال نازک‌شونده می‌شود. در حالت تولید گرما به دلیل افزایش دمای مجموعه سیال، گرادیان و تراکم خطوط همدما در مجاورت دیواره گرم کاهش یافته و بر طبق قانون بقای انرژی، خطوط همدما در نزدیکی دیواره‌های سرد محفظه متراکم‌تر می‌شوند که نشان از میزان انتقال حرارت بیشتر در این نواحی دارد. همانطور که دیده می‌شود در حالت تولید گرما در هر دو مقدار نسبت هدایت حرارتی برای سیال نازک‌شونده و در TCR=10 برای سیال ضخیم‌شونده، دمای سیال بیشتر از دیواره گرم شده که این نشان از انتقال حرارت معکوس دارد (انتقال گرما از سیال به دیواره). ٤– در مورد خطوط آنتروپی بیان این مطلب اهمیت دارد که هر اندازه شاخص توانی سیال افزایش یابد، از تراکم خطوط

و مقدار آنتروپی کاسته می‌شود و حال آن که در هر دو مقدار شاخص توانی، افزایش ضریب جذب/تولید گرما منجر به افزایش تراکم خطوط آنتروپی می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که در n=0.75، با افزایش ضریب جذب/تولید گرما، از میزان برگشت-ناپذیری‌ها در مجاورت مانع کاسته شده و به همان نسبت بر میزان برگشت‌ناپذیری‌ها در مجاورت دیواره های عمودی افزوده می-شود.

شکل (۱۰) در قسمت‌های (الف تا ج) اثر تغییرات ضریب جذب/تولید گرما و شاخص توانی سیال را بر دمای بدن بعد نشان می‌دهد. بیان دو نکته ضروری است: ۱- افزایش ضریب جذب/تولید گرما منجر به افزایش دمای سیال می‌شود و درصد این تأثیر با افزایش شاخص توانی کاهش می‌یابد تا جایی که دما برای سیال نازک‌شونده، نیوتنی و ضخیم‌شونده به ترتیب تا ۲، ۱/٤۵ و ۱/۱۵ نیز می‌رسد و این بدان معناست که در حالت تولید گرما نه تنها حرارتی از دیواره به سیال منتقل نمی‌شود بلکه عکس این حالت به وقوع می‌پیوندد. ۲- بیشترین دما به واسطه حضور مانع گرمازا و دیواره‌های عمودی آدیاباتیک، در مرکز محفظه مشاهده می‌شود به جز در حالت تولید گرما زمانی که سیال نازک-شونده است. در این حالت بیشترین دما روی دیواره‌های عایق دیده می‌شود، زیرا در این حالت بر طبق شکل (۹-الف)، دما در مجاورت دیواره‌های عمودی محفظه تا مقدار ۲ نیز می‌رسد. ذکر چند نکته راجع به شکل (۱۰) قسمت‌های (د) تا (و) (عدد ناسلت متوسط به ازای تغییرات ضریب جذب/تولید گرما، شاخص توانی سیال و نسبت هدایت حرارتی) ضروری است: ۱- در تمامی موارد، بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط مربوط به سیال نازک شونده است و با افزایش شاخص توانی از مقدار این پارامتر کاسته می‌شود. به عنوان نمونه در TCR=0.5، TCR=1 و TCR=10 با افزایش شاخص توانی از ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ در غیاب جذب/تولید گرما، عدد ناسلت متوسط به ترتیب در حدود ۱۳، ۱۷ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. زیرا در این حالات، اثرات جابجایی کاهش می-یابد. ۲- کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط به ازای تولید گرما، در جایی که دمای سیال افزایش می‌یابد، مشاهده می‌شود. مشاهده عدد ناسلت متوسط منفی در برخی حالات نشان از انتقال حرارت معکوس (سیال به دیواره) دارد. ۳- بیشترین اثر وجود جذب/تولید گرما به ازای سیال نازک‌شونده مشاهده می‌شود و با افزایش شاخص توانی این تأثیر کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه در TCR=10 با افزایش ضریب جذب/تولید گرما از ۱۰- به ۱۰+ به ترتیب برای n=0.75، n=1 و n=1.25 عدد ناسلت متوسط در حدود ۲۳۵، ۱۰۸ و ۹۱ درصد کاهش می‌یابد که این اثر با کاهش نسبت هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.

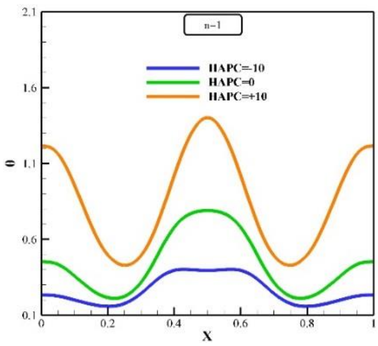
طبق جدول (۵) می‌توان دریافت که روند تغییرات آنتروپی تولید شده مشابه با عدد ناسلت است. به این ترتیب که کمترین میزان بازگشت‌ناپذیری به ازای ا ستفاده از سیال ضخیم شونده حاصل می‌شود و در حالت تولید کرما، میزان آنتروپی به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد به خصوص برای سیال نازک‌شونده که این اثر به طور محسوس قابل مشاهده است. زیرا سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی به شـــدت افزایش می‌یابد. هر اندازه نســـبت هدایت حرارتی افزایش یابد، آنتروپی بیشـــتری وجود خواهد داشت.

(الف)

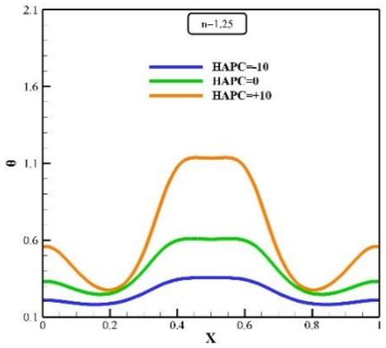


(ج)

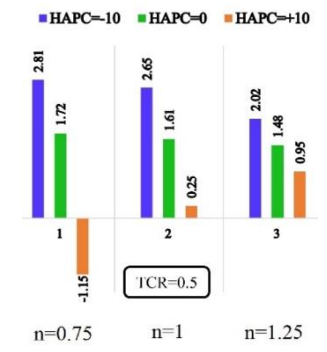
(ب)



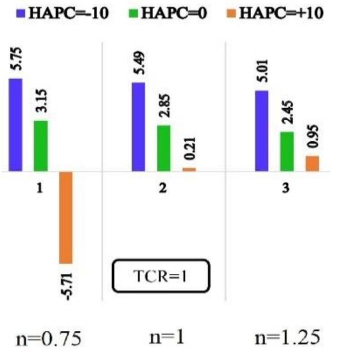
(د)

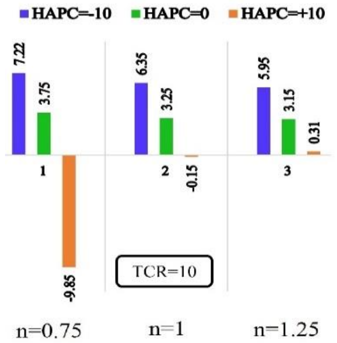


(ه)



(و)





شکل ۱۰ (الف) تا (ج) دمای بدون بعد به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال و ضریب جذب/تولید گرما برای $\mathbf{TCR = 10}$ و (د) تا (و) عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال، نسبت هدایت حراتی و ضریب جذب/تولید گرما در $\mathbf{Ha = 20, TMF2, Ra = 10^5, \varphi = -90^o}$

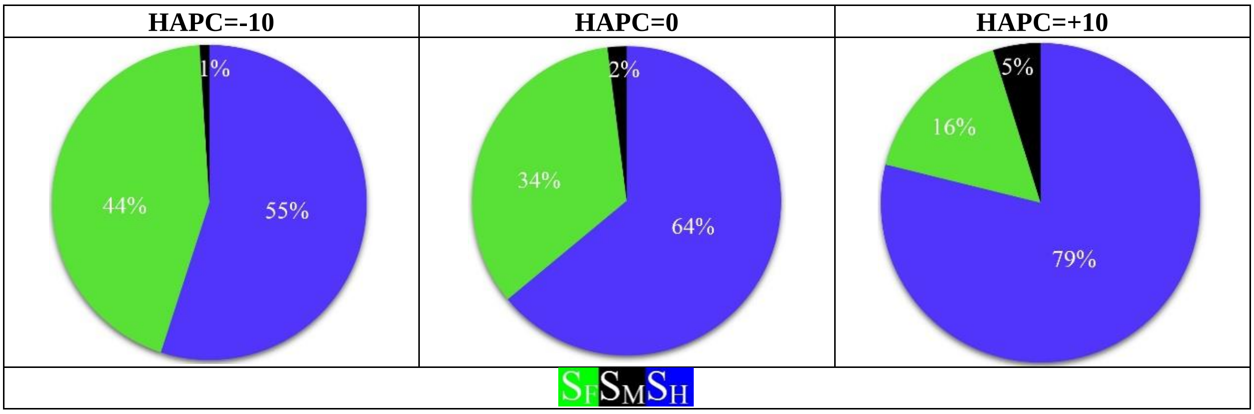
جدول ۵ مقدار انتروپی تولید شده به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال، نسبت هدایت حرارتی و ضریب جذب/تولید گرما در $\mathbf{Ha = 30, TMF2, Ra = 10^5, \varphi = -90^o}$

	HAPC=-10			HAPC=0			HAPC=+10		
	TCR=0.5	TCR=1	TCR=10	TCR=0.5	TCR=1	TCR=10	TCR=0.5	TCR=1	TCR=10
n=0.75	۳۲/۳۷	۳۳/۳۵	۳٤/۷۵	۳٤/۸۵	۳٦/۷۵	۳۹/۵۵	۵۷/۳۸	۱۰۱/۱۵	۱۱۱/٤۵
n=1	۲۹/۱۳	۲۹/۷۵	۳۱/۲۸	۳۱/۰۵	۳۲/۱۸	۳۳/۵۵	۳٦/۳۵	۵۵/٤۵	۵۹/۸۵
n=1.25	۲۵/۸۵	۲٦/۱۵	۲٦/۷۵	۲٦/۷۸	۲۷/۲۵	۲۷/۹۵	۳۱/۱۵	٤۱/۲۵	٤۳/٦۳

با توجه به شکل (۱۱-الف) دیده می‌شود که در حالت تولید گرما سهم میدان مغناطیسی در تولید آنتروپی کل بیشترین است و بیشترین مقدار عدد بجان نیز در این حالت دیده می‌شود. نکته حائز اهمیت در شکل (۱۱-ب) این است که با افزایش شاخص توانی سیال، سهم میدان مغناطیسی در تولید آنتروپی کاهش می-یابد. علت این امر کاهش سرعت حرکت سیال درون محفظه با توجه به افزایش ویسکوزیته است. عدد بجان برای سیال نازک-شونده کمتر از ۰/۵ است ولی برای سیال نیوتنی و ضخیم‌شونده سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی بیشتر از اصطکاک سیال و میدان مغناطیسی است.

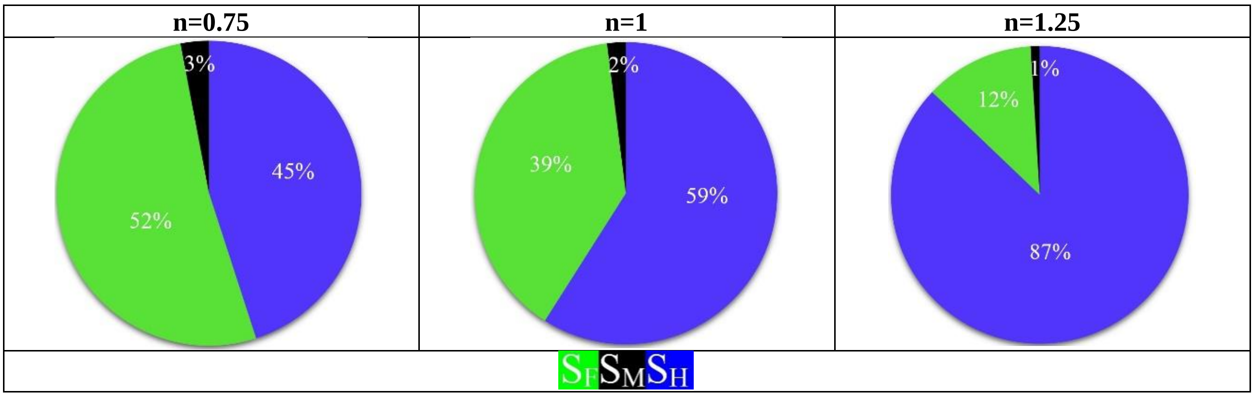
طبق شکل (۱۲) که سرعت افقی را به ازای تغییرات عدد هارتمن و عدد رایلی نشان می‌دهد، ذکر دو نکته با اهمیت است: ۱- افزایش عدد هارتمن سرعت جریان سیال را به شدت کاهش می‌دهد. زیرا زمانی که میدان مغناطیسی اعمال می‌شود، طبق رابطه (۳) نیرویی خلاف گرانش اعمال می‌شود و عملکرد جابجایی را ضعیف می‌کند. ۲- هر اندازه عدد رایلی بیشتر باشد، سرعت سیال به واسطه افزایش قدرت نیروهای شناوری بیشتر

می‌شود. همچنین با افزایش عدد رایلی، درصد اثر بخشی میدان مغناطیسی بیشتر می‌شود. زیرا قدرت نیروهای شناوری و اثرات جابجایی در این حالت بیشتر است. افزایش عدد هارتمن تا مقدار ۶۰، سبب کاهش بیشینه مقدار سرعت در حدود ۳۲ و ۷۷ درصد به ترتیب برای $Ra=10^3$ و $Ra=10^5$ می‌شود. در $Ra=10^5$ به ازای Ha=60 پروفیل سرعت تقریبا به صورت عمودی تبدیل می‌شود در حالی که در $Ra=10^3$ این اتفاق به ازای Ha=40 رخ می‌دهد. به این معنا که هر اندازه عدد رایلی پایین‌تر باشد، به قدرت میدان مغناطیسی کمتری برای کاهش سرعت نیاز است.



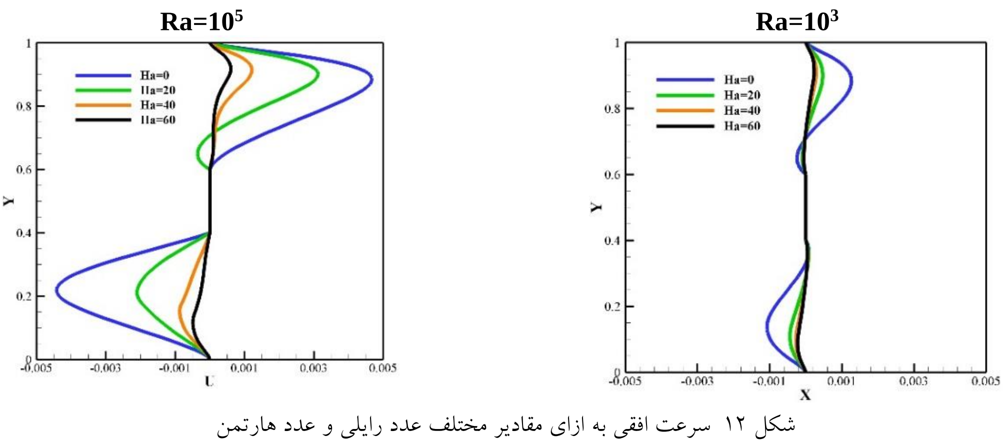
شکل ۱۱-الف درصد توزیع سهم هر یک از عوامل تولید آنتروپی در آنتروپی تولیدی کل به ازای مقادیر مختلف ضریب تولید جذب/گرما در

$TCR = 10, Ha = 30, TMF2, Ra = 10^5, \varphi = -90^o, n = 0.75$



شکل ۱۱-ب درصد توزیع سهم هر یک از عوامل تولید آنتروپی در آنتروپی تولیدی کل به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال در

$TCR = 1, Ha = 30, TMF2, Ra = 10^5, \varphi = -90^o, HAPC = 0$

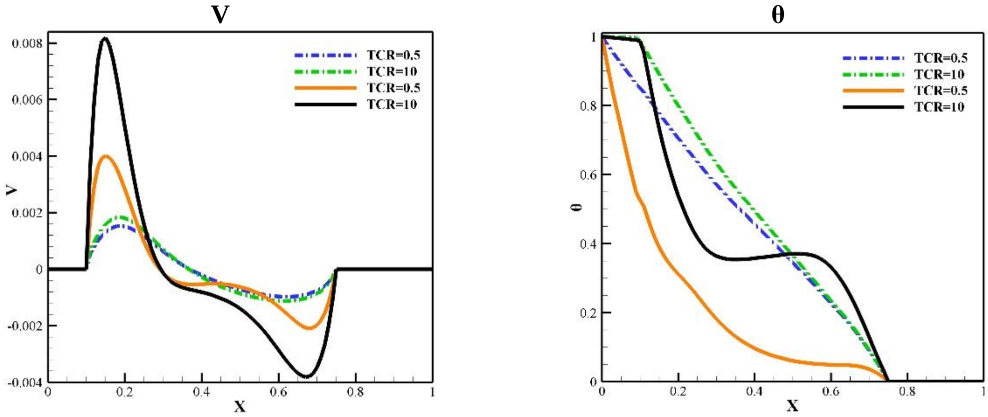


شکل ۱۲ سرعت افقی به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن

در **$n = 1, TMF3, TCR = 10, \varphi = 0, HAPC = 0$**

جدول ٦ بیشینه مقدار خطوط جریان، عدد ناسلت متوسط و مقدار انتروپی تولید شده به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و عدد هارتمن در **n = 1, TMF3, TCR = 10, φ = 0, HAPC = 0**

	$Ra=10^3$				$Ra=10^5$			
	Ha=0	Ha=20	Ha=40	Ha=60	Ha=0	Ha=20	Ha=40	Ha=60
$\lvert\Psi_{max}\rvert$	۰/۰٦۵	۰/۰۵۲	۰/۰٤۵	۰/۰٤۱	۰/۱٤	۰/۰٦	۰/۰۲۸	۰/۰۱۸
Nu	۲/۰۵	۱/۹۲	۱/۸۸	۱/۸۵	٤/٤۵	۳/۳۳	۲/۷۱	۲/٤۵
S	۳٤/۵۵	۳۳/۱۵	۳۲/٤۸	۳۱/۹۸	٤۳/۸۵	۳۹/۸۵	۳۷/۹۵	۳٦/۱۵



شکل ۱۳ سرعت عمودی به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و نسبت هدایت حرارتی

$Ra=10^3$ (خطوط نا پیوسته) و $Ra=10^5$ (خطوط پیوسته) در **n = 1, Ha = 0, φ = 0, HAPC = 0**

بر اساس جدول (٦)، قدرت جریان و عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی تا حدود ۵۵ و ۵۱ درصد بیشتر می‌شود. روندی مشابه با عدد ناسلت متوسط برای آنتروپی نیز مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل (۱۳) (سرعت عمودی و دمای بدون بعد به ازای تغییرات عدد رایلی و نسبت هدایت حرارتی) می‌توان به چند نکته اشاره داشت: ۱- سرعت گردش سیال درون محفظه با افزایش عدد رایلی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. افزایش قدرت نیروی شناوری تا حدود چهار برابر بیشینه مقدار سرعت را افزایش می‌دهد. ۲- تغییرات نسبت هدایت حرارتی در عدد رایلی پایین نا محسوس است زیرا در این حالت هدایت حرارتی فرآیند غالب انتقال حرارت است ولی در عدد رایلی بالاتر، افزایش نسبت هدایت حرارتی تا دو برابر مقدار بیشینه سرعت را افزایش می‌دهد. ۳- در $Ra=10^3$ پروفیل دما با تغییر نسبت هدایت حرارتی چندان تغییر نمی‌کند و به صورت خطی است که نشان از عدم اثرات جابجایی دارد ولی برای $Ra=10^5$ تغییرات این پارامتر بسیار محسوس است.

بر طبق جدول (۷)، تغییر نسبت هدایت حرارتی از ۰/۵ به ۱۰ منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط در حدود ٦۱ و ۱۹۰ درصد به ترتیب برای اعداد رایلی ۱۰۳ و ۱۰۵ می‌شود. روندی مشابه با تغییرات عدد ناسلت متوسط برای آنتروپی تولیدی نیز مشاهده می‌شود. نکته حائز اهمیت، سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی است که برای عدد رایلی کمتر، بالای ۹۰ درصد است در حالی که در عدد رایلی بزرگتر به دلیل بیشترین شدن اثرات جابجایی، سهم انتقال حرارت کاهش می‌یابد و عدد بجان کمتری حاصل می‌شود.

چهار نکته حائز اهمیتی که در شکل (١٤) قسمت‌های (الف) تا (ج) (تغییرات سرعت عمودی به ازای تغییرات عدد هارتمن، شاخص توانی سیال و نوع اعمال میدان مغناطیسی) وجود دارد عبارتند از: ۱- افزایش شاخص توانی، طبق رابطه (۸) ویسکوزیته سیال را افزایش می‌دهد، بنابراین از سهولت حرکت و گردش سیال داخل محفظه کاسته می‌شود به نحوی که سرعت برای سیال نازک‌شونده تا حدود بیش از دو برابر بیشتر از سیال ضخیم‌شونده است. ۲- با تغییر نوع اعمال میدان مغناطیسی می‌توان سرعت سیال در حال چرخش داخل محفظه را تحت کنترل قرار داد. با اعمال میدان مغناطیسی به صورت TMF1 با توجه به شکل (۲-الف)، نیروی مقاوم حجمی کمتری خلاف گرانش به سیال وارد

می‌شود و طبق رابطه (۳)، سرعت سیال در تمامی مقادیر عدد هارتمن و شاخص توانی در این حالت بیشترین است و کمترین سرعت با اعمال یکنواخت حاصل می‌شود. ۳- هر اندازه عدد هارتمن بیشتر شود، تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی محسوس‌تر می‌شود. در Ha=20، Ha=40 و Ha=60 تغییر نوع اعمال میدان مغناطیسی از TMF1 به TMF3 به ترتیب در حدود ۲٦، ۵۰ و ٦٤ درصد از سرعت جریان سیال می‌کاهد. ٤- اثر افزایش عدد هارتمن و تغییر نوع اعمال میدان مغناطیسی برای سیال ضخیم‌شونده با توجه به کمتر بودن اثرات جابجایی نسبت به سیال نازک‌شونده، کمتر است.

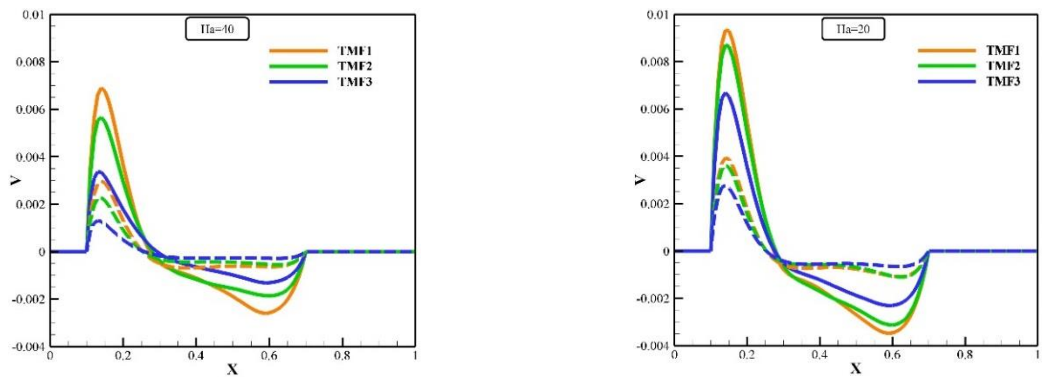
طبق شکل (١٤) قسمت‌های (د) تا (و) که عدد ناسلت متوسط را به ازای تغییرات شاخص توانی سیال، عدد هارتمن و نوع اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد: ١- افزایش عدد هارتمن از صفر تا ٦٠ منجر به کاهش تا ٤٦، ٣٩ و ١٨ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای سیال نازک‌شونده، نیوتنی و ضخیم شونده می شود. ٢- بیشترین تأثیر کاهش عدد نا سلت متوسط با افزایش عدد هارتمن مربوط TMF3 است و هر اندازه عدد هارتمن بیشتر شود، تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی محسوس‌تر است. در Ha=20، چنانچه TMF1 به TMF3 تغییر کند، عدد ناسلت متوسط در حدود ١۵ درصد کاهش می‌یابد که این تأثیر در Ha=60 در حدود ٢٨ درصد است.

نکات قابل استباط از جدول (٨) که عدد ناسلت متوسط، بیشینه مقدار خطوط جریان و مقدار آنتروپی تولیدی را به ازای تغییرات عدد هارتمن و ضریب جذب/تولید گرما را ارائه می‌دهد: ١- اثر اعمال میدان مغناطیسی در کاهش عدد ناسلت متوسط با افزایش ضریب جذب/تولید گرما افزایش می‌یابد. افزایش عدد هارتمن از صفر تا ٦٠ منجر به کاهش عدد نا سلت متوسط در حدود ١٣/۵، ١٩/٢ و ١٣١ درصد به ترتیب برای HAPC=-10، HAPC=0 و HAPC=+10 می‌شود. زیرا با افزایش ضریب جذب/تولید گرما، اثرات جابجایی بیشتر می‌شود. ٢- بیشترین قدرت جریان مربوط به حالت تولید گرما است و روند تغییرات قدرت جریان به ازای تغییرات عدد هارتمن، مشابه با عدد ناسلت متوسط است. ٣- به ازای $HAPC \leq 0$ افزایش عدد هارتمن از مقدار آنتروپی تولیدی کل کم می‌کند همانطور که راجع به شکل (٩) و جدول (۵) بیان شد. اما در حالت تولید گرما، عکس این مطلب دیده می‌شود و مقدار آنتروپی تولیدی کل با افزایش عدد هارتمن تا ٢٠ درصد افزایش می‌یابد.

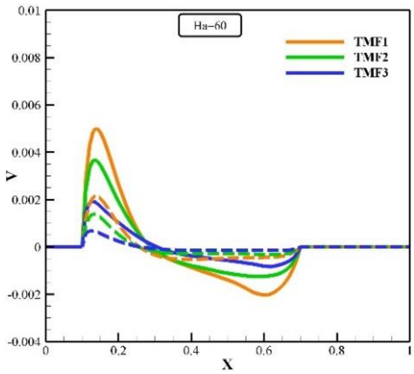
جدول (٧): عدد ناسلت متوسط، مقدار انتروپی تولید شده و عدد بجان به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی و نسبت هدایت حرارتی در
$\mathbf{n = 1, Ha = 0, \varphi = 0, HAPC = 0}$

	$Ra=10^3$			$Ra=10^5$		
	TCR=0.5	TCR=1	TCR=10	TCR=0.5	TCR=1	TCR=10
Nu	١/٠١	١/٢٧	١/٦٣	١/۵٣	٣/٨٢	٤/٤۵
S	٣٤/۵۵	٣۵/٧١	٣٦/٢۵	٤٣/٨۵	٤٧/٠۵	٤٩/۵۵
Be	٠/٩۵	٠/٩٢	٠/٩١	٠/٨١	٠/٧٢	٠/٦٣

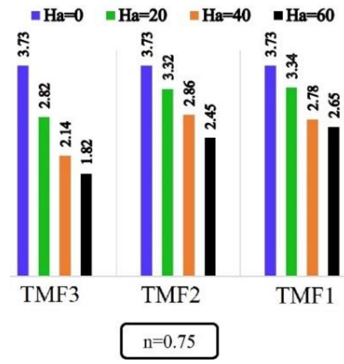
(الف) (ب)



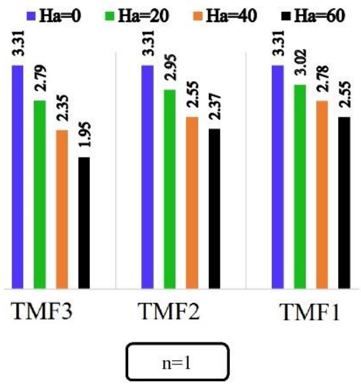
(ج) (د)

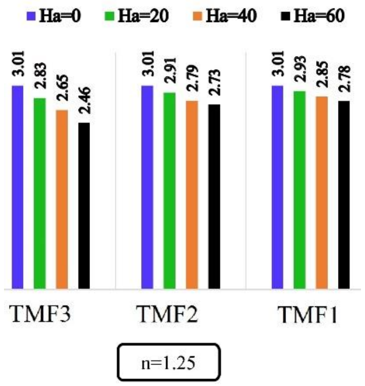


(ه)



(و)





شکل ۱۴ (الف) تا (ج) سرعت عمودی به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال، عدد هارتمن و نوع اعمال میدان مغناطیسی خطوط پیوسته (n=0.75) و خطوط ناپیوسته (n=1.25) و (د) تا (و) عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی سیال، عدد هارتمن و نوع اعمال میدان مغناطیسی در $\mathbf{TCR = 1, HAPC = 0, Ra = 10^5, \varphi = 0}$

جدول ۸ بیشینه مقدار خطوط جریان، عدد ناسلت متوسط و مقدار انتروپی تولید شده به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و ضریب جذب/تولید گرما در $\mathbf{TCR = 10, n = 1, Ra = 10^5, \varphi = -90^\circ, TMF2}$

	HAPC=-10			HAPC=0			HAPC=+10		
	$\lvert\Psi_{max}\rvert$	Nu	S	$\lvert\Psi_{max}\rvert$	Nu	S	$\lvert\Psi_{max}\rvert$	Nu	S
Ha=0	۰/۰۴۶	۶/۶۸	۳۴/۷۵	۰/۰۵۴	۳/۵۳	۳۶/۸۱	۰/۰۵۶	−۰/۰۸	۵۵/۶۶
Ha=20	۰/۰۴۱	۶/۳۵	۳۱/۲۸	۰/۰۴۷	۳/۲۵	۳۳/۵۵	۰/۰۴۹	−۰/۱۵	۵۹/۸۵
Ha=40	۰/۰۳۳	۶/۰۳	۳۰/۲۵	۰/۰۳۶	۳/۰۱	۳۱/۴۵	۰/۰۳۳	−۰/۱۶۸	۶۳/۴۴
Ha=60	۰/۰۳۱	۵/۷۸	۲۹/۸۵	۰/۰۳۲	۲/۸۵	۲۹/۴۵	۰/۰۲۸	−۰/۱۸۵	۶۶/۷۵

نتیجه‌گیری

انگیزه‌ی انجام از شبیه‌سازی عددی حاضر، بررسی و تحلیل انتقال حرارت و آنتروپی تولید شده سیال با مدل توانی درون محفظه دو بعدی با زاویه قرارگیری متغیر حاوی مانعی گرمازا است. میدان مغناطیسی در سه شکل مختلف به صورت افقی و عمود بر نیروی گرانش بر محفظه اعمال شد در حالی که جذب/تولید گرما یکنواختی بر جریان سیال اثر می‌گذارد. شبیه‌سازی با نوشتن کد رایانه‌ای به زبان فرترن با استفاده از روش لتیس بولتزمن صورت پذیرفت. صحت نتایج به دست آمده در مقایسه با مطالعات مراجع مختلف به صورت کیفی و کمی تأیید شد. اثر عدد رایلی، عدد هارتمن، نوع اعمال میدان مغناطیسی، شاخص توانی سیال، ضریب جذب/تولید گرما، نسبت هدایت حرارتی و زاویه تمایل محفظه بر مشخصات جریان جابجایی طبیعی ارزیابی شد. مهمترین نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

۱- در تمامی حالات، افزایش عدد هارتمن سبب کاهش سرعت جریان شده و به تبع آن از مقدار قدرت جریان و عدد ناسلت متوسط می‌کاهد. به طور میانگین این اثر برای سیال نازک‌شونده در حدود ۳۲ درصد بیشتر از سیال ضخیم‌شونده

است.

۲- نوع اعمال میدان مغناطیسی پارامتر بسیار مهمی در کنترل میزان انتقال حرارت است و برای دست‌یابی به جریان‌هایی با قدرت دلخواه می‌توان از این متغیر استفاده کرد. اعمال میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت در مقایسه با سایر حالات منجر به کاهش بیشتر میزان انتقال حرارت و قدرت جریان می‌شود. اثر تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی با افزایش شاخص توانی، کاهش می‌یابد.

۳- افزایش شاخص توانی سیال منجر به افزایش ویسکوزیته سیال شده و سبب می‌شود که سهولت حرکت سیال کم شود که این عامل منجر به کاهش قدرت جریان و مقدار انتقال حرارت می‌شود به نحوی که هدایت حرارتی پدیده غالب انتقال حرارت برای سیال ضخیم‌شونده است. به دلیل کم بودن اثرات جابجایی برای سیال ضخیم‌شونده، اثر افزایش عدد هارتمن برای سیال ضخیم‌شونده در مقایسه با سیال نیوتنی و نازک‌شونده بسیار کمتر است.

٤- با تغییر دادن نحوه قرارگیری محفظه می‌توان مقدار انتقال حرارت و قدرت جریان را تحت کنترل درآورد. با استفاده از این روش که بدون صرف نیروی خارجی محقق می‌شود، می‌توان اثر میدان مغناطیسی را نیز کنترل کرد به نحوی که کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط، آنتروپی تولید شده و تأثیر میدان مغناطیسی به ازای زاویه تمایل ۹۰+ درجه حاصل می‌شود. عدد ناسلت متوسط برای زاویه صفر به ترتیب تا حدود ۱/۲۵ و ۲/٦ برابر بیشتر از زوایای ۹۰- و ۹۰+ درجه است.

۵- هر اندازه نسبت هدایت حرارتی کمتر باشد، مقدار عدد ناسلت متوسط و آنتروپی تولید شده نیز کمتر می‌شود. با افزایش این متغیر، اثر میدان مغناطیسی بارزتر است و تغییر این پارامتر اثر ناچیزی بر مشخصات جریان و انتقال حرارت سیال ضخیم‌شونده و در عدد رایلی $۱۰^۳$ دارد.

٦- در حالت تولید گرما، کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط دیده می‌شود ولی اثر میدان مغناطیسی در این حالت بیشترین است. قدرت جریان با افزایش ضریب جذب/تولید گرما افزایش می‌یابد. اثر جذب/تولید گرما برای سیال ضخیم‌شونده کمترین است.

۷- عموما بیشترین سهم آنتروپی تولید شده برای سیال ضخیم‌شونده در تمامی حالات متعلق به آنتروپی تولید شده ناشی از انتقال حرارت است. با افزایش نسبت هدایت حرارتی، افزایش عدد رایلی، کاهش شاخص توانی سیال و کاهش عدد هارتمن عدد بجان کاهش می‌یابد.

۸- براساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که در حالت تولید گرما، آنتروپی تولیدی کل با افزایش عدد هارتمن، تا حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و به ازای $0 \le \text{HAPC}$، افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش میزان آنتروپی تولید شده می‌شود.

۹- استفاده از تابع توزیع جداگانه برای مدل کردن میدان مغناطیسی دقت نتایج بالاتری را نتیجه می‌دهد در قیاس با حالتی که دو تابع توزیع برای میدان جریان و میدان دما فرض شود و میدان مغناطیسی به صورت عبارت چشمه اعمال شود. همچنین می‌توان برای در اختیار گرفتن مدیریت انرژی و دستیابی به جریان‌های دلخواه، از روشهای غیرفعال در کنار روش‌های فعال سود برد.

تقدیر و تشکر

واژه‌نامه

فهرست علائم

قدرت میدان مغناطیسی	B
عدد بجان	Be
سرعت گسسته شبکه	**c**
نیروی خارجی	**F**
تابع توزیع مربوط به میدان جریان	f
تابع توزیع مربوط به میدان دما	g
تابع توزیع تعادلی مربوط به میدان جریان	f^{eq}
تابع توزیع تعادلی مربوط به میدان دما	g^{eq}
شتاب جاذبه	**g**
طول و ارتفاع محفظه	L
عدد هارتمن	Ha
ضریب جذب/تولید گرما	HAPC
ضریب هدایت حرارتی	k
شاخص توانی سیال	n

عدد ناسلت	Nu	موقعیت مکانی	**x** (x,y)
تابع توزیع مربوط به میدان مغناطیسی	h	**علائم یونانی**	
تابع توزیع تعادلی مربوط به میدان مغناطیسی	h^{eq}	ضریب پخش حرارتی	α
		ضریب انبساط حرارتی	β
متغیر جذب/تولید گرما	Q	زمان آسایش مربوط به میدان جریان	τ^{*}
عدد رایلی	Ra	زمان آسایش مربوط به میدان دما	τ^{**}
آنتروپی	S	زمان آسایش مربوط به میدان مغناطیسی	τ^{***}
آنتروپی ناشی از اصطکاک سیال	S_F		
آنتروپی ناشی از انتقال حرارت	S_H	ویسکوزیته سینماتیکی	υ
آنتروپی ناشی از میدان مغناطیسی	S_M	دمای بی بعد	θ
دما	T	ویسکوزیته دینامیکی	μ
نسبت هدایت حرارتی	TCR	چگالی	ρ
نوع اعمال میدان مغناطیسی	TMF	تابع جریان	ψ
ضخامت دیواره جامد	W	ضریب وزنی	ω
سرعت	u (u,v)		

مراجع

1. Cao, X., Gao, D., Huang, Y., and Liu, X., "An Improved Lattice Boltzmann Model for Convection Melting in the Existence of an Inhomogeneous Magnetic Field", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 33, Pp. 1-5, (2021).
2. Amine, B.M., Redouane, F., Mourad, L., Jamshed, W., Eid, M.R., and Al-Kouz, W., "Magnetohydrodynamics Natural Convection of a Triangular Cavity Involving Ag-MgO/Water Hybrid Nanofluid and Provided with Rotating Circular Barrier and a Quarter Circular Porous Medium at Its Right-Angled Corner", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 46, Pp. 12573-12597, (2021).
3. Akgül, A., and Siddique, I., "Novel Applications of the Magnetohydrodynamics Couple Stress Fluid Flows Between Two Plates with Fractal-Fractional Derivatives", *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, Vol. 37, Pp. 2178-2189, (2021).
4. Nemati, M., Sefid, M., and Rahmati, A.R., "The Effect of Changing the Position of the Hot Wall and Increasing the Amplitude and Number of Oscillations of Wavy Wall on the Flow and Heat Transfer of Nanofluid Inside the Channel in the Presence of Magnetic Field", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10, Pp. 219-236, (2020).
5. Zhang, Y., Zhang, G., Zhang, Z., Zhang, Y., and Huang, Y., "Effect of Assisted Transverse Magnetic Field on Distortion Behavior of Thin-Walled components in WEDM Process", *Chinese Journal of Aeronautics,* Vol. 35, Pp. 291-307, (2022).
6. Roy, N.C., "MHD Natural Convection of a Hybrid Nanofluid in an Enclosure with Multiple Heat Sources", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, Pp. 1679-1694 (2022).
7. Borrelli, A., Giantesio, G., and Patria, M.C., "Exact Solutions in MHD Natural Convection of a Bingham Fluid: Fully Developed Flow in a Vertical Channel", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*", Vol. 147, Pp. 5825-5838, (2022).

8. Mahdy, A., Hady, F.M., Mohamed, R.A., and Abo-zaid, O.A., "Internal Heat Generation Impact on MHD Natural Convection of Dusty Hybrid Nanomaterials within a Porous Cavity", *Heat Transfer*, Vol. 51, Pp. 1150-1169, (2022).
9. Nemati, M., Sefid, M., Mohammad Sajadi, S., Ghaemi, F., and Baleanu, D., "Lattice Boltzmann Method to Study Free Convection and Entropy Generation of Power-Law Fluids Under Influence of Magnetic field and Heat Absorption/Generation", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 147, Pp. 10569-10594, (2022).
10. Chen, Z., and Shu, C., "Simplified Lattice Boltzmann Method for Non-Newtonian Power-Law Fluid Flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 92, Pp. 38-54, (2020).
11. Ismael, A., Eldabe, N.T., Abouzeid, M., and Elshabouri, S., "Entropy Generation and Nanoparticles CuO Effects on MHD Peristaltic Transport of Micropolar Non-Newtonian Fluid with Velocity and Temperature Slip Conditions", *Egyptian Journal of Chemistry*, Vol. 65, Pp. 715-722, (2022).
12. Ho, C.D., Tu, J.W., Chang, H., Lin, L.P., Chew, T.L., "Optimizing Thermal Efficiencies of Power-Lw Fluids in Double-Pass Concentric Circular Heat Exchangers with Sinusoidal Wall Fuxes", *Mathematical Biosciences and Engineering*, Vol. 19, Pp. 8648-8670, (2022).
13. Rahmati, A.R., and Nemati, M., "Investigation of Magnetic Field Effect on Nanofluid Mixed Convection Inside Lid-Driven K-Shaped Enclosure Using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 8, Pp. 111-126, (2018).
14. Sun, C., Zhang, Y., Farahani, S.D., Hu, C., Nemati, M., and Sajadi, S.M., "Analysis of Power-Law Natural Conjugate Heat Transfer Under the Effect of Magnetic Field and Heat Absorption/Production Based on the First and Second Laws of Thermodynamics for the Entropy via Lattice Boltzmann Method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 144, Pp. 165-184, (2022).
15. Abdulkadhim, A., mejbel Abed ,I., and mahjoub Said, N., "An Exhaustive Review on Natural Convection within Complex Enclosures: Influence of Various Parameters", *Chinese Journal of Physics*, Vol. 74, Pp. 365-374, (2021).
16. Nemati, M., Sefid, M., and Rahmati, A., "Analysis of the Effect of Periodic Magnetic Field, Heat Absorption/Generation and Aspect ratio of the Enclosure on Non-Newtonian Natural Convection", *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, Vol. 8, Pp. 187-203, (2021).
17. Khan, M.R., Mao, S., Deebani, W., and Elsiddieg, A.M., "Numerical Analysis of Heat Transfer and Friction Drag Relating to the Effect of Joule Heating, Viscous Dissipation and Heat Generation/Absorption in Aligned MHD Slip Flow of a Nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 131, Pp. 105843, (2022).
18. Ojemeri, G., and Hamza, M.M., "Heat Transfer Analysis of Arrhenius-Controlled Free Convective Hydromagnetic Flow with Heat Generation/Absorption Effect in a Micro-Channel", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, Pp. 12797-12811, (2022).
19. Dar, A.A., "Effect of Thermal Radiation, Temperature Jump and Inclined Magnetic Field on the Peristaltic Transport of Blood Flow in an Asymmetric Channel with Variable Viscosity and Heat Absorption/Generation", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 45, Pp. 487-501, (2021).
20. Gambo, J.J., and Gambo, D., "On the Effect of Heat Generation/Absorption on Magnetohydrodynamic Free Convective Flow in a Vertical Annulus: An Adomian Decomposition Method", *Heat Transfer*, Vol. 50, Pp. 2288-

2302, (2021).

21. Al-Farhany, K., Al-Chlaihawi, K.K., Al-dawody, M.F., Biswas, N., and Chamkha, A.J., "Effects of Fins on Magnetohydrodynamic Conjugate Natural Convection in a Nanofluid-Saturated Porous Inclined Enclosure", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Pp. 105413, (2021).
22. Siddiqa, S., Begum, N., Hossain, M.A., Abrar, M.N., Gorla, R.S., and Al-Mdallal, Q., "Effect of Thermal Radiation on Conjugate Natural Convection Flow of a Micropolar Fluid Along a Vertical Surface", *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 83, Pp. 74-83, (2021).
23. Nemati, M., and Sefid, M., "Evaluation of Amount the Entropy Production Due to MHD Hybrid Nanofluid Conjugate Heat Transfer with Heat Absorption/Generation", *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 10, Pp. 141-168, (2022).
24. Faizan, M., Pati, S., and Randive, P.R., "Effect of Non-Uniform Heating on Conjugate Heat Transfer Performance for Nanofluid Flow in a Converging Duct by a Two-Phase Eulerian–Lagrangian Method", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 236, Pp. 414-424, (2022).
25. Ren, Q., Wang, Z., Lai, T., Zhang, J., and Qu, Z.G., "Conjugate Heat Transfer in Anisotropic Woven Metal Fiber-Phase Change Material Composite", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 189, Pp. 116618, (2021).
26. Fureby, C., "Large Eddy Simulation of Turbulent Reacting Flows with Conjugate Heat Transfer and Radiative Heat Transfer", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, Pp. 3021-3029, (2021).
27. Nemati, M., and Sefid M., "The Application of Multiple Relaxation Time Lattice Boltzmann Method to Simulate the Newtonian and Non-Newtonian MHD Natural Convection in Cavity with Lozenge Barrier", *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 10, Pp. 17-35, (2021).
28. Nemati, M., Sefid, M., Jahromi, B., and Jahangiri, R., "The Effect of Magnetic Field and Nanoparticle Shape on Heat Transfer in an Inclined Cavity with Uniform Heat Generation/Absorption", *Computational Methods in Engineering*, Vol. 40, Pp. 109-126, (2022).
29. Shan, F., Du, H., Chai, Z., and Shi, B., "Lattice Boltzmann modeling of the Capillary Rise of Non-Newtonian Power-Law Fluids", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 94, Pp. 251-271, (2022).
30. Gohari, E.M., Sefid, M., Malooze, A.R., and Mozafari-Shamsi, M., "Hydrodynamic Simulation of Liquid-Solid Fluidized Bed with Non-Newtonian Power-Law Fluids Using SPM-LBM Method", *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 51, Pp. 245-250, (2022).
31. Mehmood, A., Khan, S., Iqbal, M.S., and Butt, A.S., "Computational Analysis of Entropy Generation in Mixed Convection Flow Past a Vertical Wavy Cone", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 147, Pp. 6983-6992, (2022).
32. Al-Chlaihawi, K.K., Alaydamee, H.H., Faisal, A.E., Al-Farhany, K., and Alomari, M.A., "Newtonian and Non-Newtonian Nanofluids with Entropy Generation in Conjugate Natural Convection of Hybrid Nanofluid-Porous Enclosures: A Review", *Heat Transfer*, Vol. 51, Pp. 1725-1745, (2022).
33. Mliki, B., and Abbassi, M.A., "Entropy Generation of MHD Natural Convection Heat Transfer in a Heated Incinerator

Using Hybrid-Nanoliquid", *Propulsion and Power Research*, Vol. 10, Pp. 143-154, (2021).

34. Gal, S., Kolsi, L., Hassen, W., Ben Ali, N., Ben Khedher, N., and Chamkha, A.J., "Three-Dimensional Study of Magnetohydrodynamic Natural Convection, Entropy Generation, and Electromagnetic Variables in a Nanofluid Filled Enclosure Equipped with Inclined Fins", *ACS Omega*, Vol. 7, Pp. 12365-12373, (2022).
35. Aghakhani, S., Pordanjani, A.H., Karimipour, A., Abdollahi, A., and Afrand, M., "Numerical Investigation of Heat Transfer in a Power-Law Non-Newtonian Fluid in a C-Shaped Cavity with Magnetic Field Effect Using Finite Difference Lattice Boltzmann Method", *Computers & Fluids*, Vol. 176, Pp. 51-67, (2018).
36. Rezaie, M., and Maghrebi, M.J., "Numerical Investigation of Conjugate Natural Convection Heat Transfer in Porous Enclosure with Lattice Boltzmann Method", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 5, Pp. 217-231, (2019).
37. Ferhi, M., Djebali, R., Abboudi, S., and Kharroubi, H., "Conjugate Natural Heat Transfer Scrutiny in Differentially Heated Cavity Partitioned with a Conducting Solid using the Lattice Boltzmann Method", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 138, Pp. 3065-3088, (2019).
38. Zhang, R., Aghakhani, S., Pordanjani, A.H., Vahedi, S.M., Shahsavar, A., and Afrand, M., "Investigation of the Entropy Generation During Natural Convection of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Inside the L-Shaped Cavity Subjected to Magnetic Field: Application of Lattice Boltzmann Method", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135, Pp. 184-201, (2020).
39. Mliki, B., Ali, C., and Abbassi, M.A., "Lattice Boltzmann Simulation of MHD Natural Convection Heat Transfer of Cu-Water Nanofluid in a Linearly/Sinusoidally Heated Cavity", *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, Vol. 14, Pp. 7-11, (2020).
40. Mohebbi, R., and Rasam, H., "Numerical Simulation of Conjugate Heat Transfer in a Square Cavity Consisting the Conducting Partitions by Utilizing Lattice Boltzmann Method", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 546, Pp. 123050, (2020).
41. Nemati, M., Sani, H.M., and Chamkha, A.J., "Optimal Wall Natural Convection for a Non-Newtonian Fluid with Heat Generation/Absorption and Magnetic Field in a Quarter-Oval Inclined Cavity", *Physica Scripta*, Vol. 96, Pp. 125234, (2021).
42. Nemati, M., Mohamadzade, H.M., and Sefid, M., "Investigation the Effect of Direction of Wall Movement on Mixed Convection in Porous Enclosure with Heat Absorption/Generation and Magnetic Feld", *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 9, Pp. 99-115, (2020).
43. Rahman, A., Nag, P., Molla, M.M., and Hassan, S., "Magnetic Field Effects on Natural Convection and Entropy Generation of Non-Newtonian Fluids Using Multiple-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Method", *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 32, Pp. 2150015, (2021).
44. Nemati, M., Sani, H.M., Jahangiri, R., Sefid, M., Mohammad Sajadi, S., Baleanu, D., and Ghaemi, F., "Convection Heat Transfer Under the Effect of Uniform and Periodic Magnetic Fields with Uniform Internal Heat Generation: a New Comprehensive Work to Develop the Ability of the Multi Relaxation Time Lattice Boltzmann Method", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 147, Pp. 7883-7897, (2022).

45. Rostami, S., Ellahi, R., Oztop, H.F., and Goldanlou, A.S., "A Study on the Effect of Magnetic Field and the Sinusoidal Boundary Condition on Free Convective Heat Transfer of Non-Newtonian Power-Law Fluid in a Square Enclosure with Two Constant-Temperature Obstacles Using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, Pp. 2557-2573, (2021).
46. Ferhi, M., Djebali, R., Al-Kouz, W., Abboudi, S., and Chamkha, A.J., "MHD Conjugate Heat Transfer and Entropy Generation Analysis of MWCNT/Water Nanofluid in a Partially Heated Divided Medium", *Heat Transfer*, Vol. 50, Pp. 126-144, (2021).
47. Nemati, M., Sani, H.M., Jahangiri, R., and Chamkha, A.J., "MHD Natural Convection in a Cavity with Different Geometries Filled with a Nanofluid in the Presence of Heat Generation/Absorption Using Lattice Boltzmann Method", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 147, Pp. 9067-9081, (2022).
48. Rahman, A., Redwan, D.A., Thohura, S., Kamrujjaman, M., and Molla, M.M., "Natural Convection and Entropy Generation of Non-Newtonian Nanofluids with Different Angles of External Magnetic Field Using GPU Accelerated MRT-LBM", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 30, Pp. 101769, (2022).
49. Ferhi, M., Djebali, R., Mebarek-Oudina, F., Abu-Hamdeh, N.H., and Abboudi, S., "Magnetohydrodynamic Free Convection Through Entropy Generation Scrutiny of Eco-Friendly Nanoliquid in a Divided L-Shaped Heat Exchanger with Lattice Boltzmann Method Simulation", *Journal of Nanofluids*, Vol. 11, Pp. 99-112, (2022).
50. Ilis, G.G., Mobedi, M., and Sunden, B., "Effect of Aspect Ratio on Entropy Generation in a Rectangular Cavity with Differentially Heated Vertical Walls", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, Pp. 696-703, (2008).
51. Khezzar, L., Siginer, D., and Vinogradov, I., "Natural Convection of Power Law Fluids in Inclined Cavities", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 53, Pp. 8-17, (2012).
52. Kefayati, G.R., "Mesoscopic Simulation of Magnetic Field Effect on Natural Convection of Power-Law Fluids in a Partially Heated Cavity", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 94, Pp. 337-354, (2015).